

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



VLADIMÍR SKALNÍK

Fotovoltaická fasáda na TU v Liberci

(The Photovoltaic facade on the Technical University of Liberec)

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Unger, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Dalibor Skácel

Rozsah práce:

Počet stran: 110

Počet obrázků: 24

Počet tabulek: 34

Počet grafů: 8

Počet příloh: 54

Liberec 2006

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá přímou přeměnou energie slunečního záření na energii elektrickou, a to s využitím fotovoltaického jevu prostřednictvím fotovoltaických systémů.

V experimentální části se diplomová práce nejprve zabývá stanovením účinnosti přeměny energie slunečního záření na fotovoltaické fasádě, posouzením a vyhodnocením použitého zařízení a navržením vhodných optimalizačních opatření.

Dále se v experimentální části diplomová práce zabývá porovnáním fotovoltaické fasády, instalované na Technické univerzitě v Liberci, s obdobnými aplikacemi instalovanými na dalších univerzitách v České republice v rámci programu Evropské unie s názvem PV Enlargement.

ANOTATION

The thesis deals with direct conversion of solar radiation energy into electric power namely using of photovoltaic effect through photovoltaic systems.

At first, experimental part of the thesis is concerned with efficiency assesment of conversion of solar radiation energy into the photovoltaic facade, check and evaluation of used arrangement and proposition suitable for optimization procurations.

Further experimental part of the thesis compares the photovoltaic facade applied at the Technical University of Liberec to similar applications installed at other universities in the Czech Republic within the European union programme named PV Enlargement.

PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 27. 4. 2006

Podpis:

DECLARATION

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

Im fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis an a consultant.

Date: 27. 4. 2006

Signature:

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval Doc. Ing. Jiřímu Ungerovi, CSc. za odborné vedení při zpracování diplomové práce a Ing. Daliboru Skácelovi za poskytnuté konzultace.

Dále bych rád poděkoval panu Bohumilu Ostrčilovi za pomoc při měření na fotovoltaické fasádě.

Chtěl bych rovněž poděkovat Ing. Martinu Chudobovi a Ing. Jiřímu Klimentovi z firmy SOLARTEC s.r.o. za poskytnuté informace k problematice fotovoltaických instalací.

Závěrem bych rád poděkoval Ing. Petru Dohnalovi z VUT v Brně, Ing. Janu Novákovi ze ZČU v Plzni a Ing. Petru Czekajovi z VŠB-TU v Ostravě za poskytnutá data z fotovoltaických instalací na zmíněných univerzitách.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Část rešeršní	13
2.1	Sluneční energie.....	13
2.1.1	Fyzikální podstata slunečního záření.....	13
2.1.2	Matematická teorie	14
2.1.3	Sluneční energie v praxi	17
2.2	Fotovoltaika a její využití	18
2.2.1	Fotovoltaické jevy	18
2.2.2	Fotovoltaický článek.....	21
2.2.3	Fotovoltaické moduly	24
2.2.4	Fotovoltaické systémy	24
2.2.5	Prvky FVS	27
3	Projekt PV Enlargement.....	29
4	Fotovoltaická fasáda.....	29
4.1	Popis fotovoltaické fasády	29
4.2	Základní ukazatele FVF.....	33
5	Další fotovoltaické instalace.....	34
5.1	FVS na VŠB - TU v Ostravě	34
5.2	FVS na MFF Univerzity Karlovy v Praze	36
5.3	FVS na VUT v Brně	39
5.4	FVS na ZČU v Plzni	41
6	Část teoretická	44
6.1	Fotovoltaická fasáda	44

6.1.1	Metodika stanovení základních ukazatelů	44
6.1.2	Účinnost fotovoltaické fasády	45
6.1.3	Účinnost konverze energie slunečního záření	45
6.1.4	Účinnost použitých měničů napětí.....	45
6.1.5	Závislost výkonu fotovoltaických modulů na jejich teplotě.....	46
6.2	Porovnání fotovoltaických instalací	47
6.2.1	Metodika stanovení kvantitativních ukazatelů	48
6.2.2	Metodika stanovení kvalitativních ukazatelů	49
7	Část experimentální.....	51
7.1	Údaje o měření a měřících přístrojích	51
7.1.1	Měřicí systém fotovoltaické fasády	51
7.1.2	Kontrolní měření.....	52
7.2	Měření na fotovoltaické fasádě.....	59
7.2.1	Stanovení základních ukazatelů fotovoltaické fasády	59
7.2.2	Přehled vyrobené elektrické energie fotovoltaickou fasádou	63
7.3	Porovnání fotovoltaických instalací	64
7.3.1	Kvantitativní ukazatele fotovoltaických instalací.....	64
7.3.2	Kvalitativní ukazatele fotovoltaických instalací.....	67
7.3.3	Vyhodnocení ukazatelů fotovoltaických instalací	69
8	Environmentální vyhodnocení FVF	70
9	Ekonomické hodnocení FVF.....	71
10	Možnosti optimalizace FVF	73
11	Závěr	75
	Seznam literatury	78
	Seznam příloh.....	79

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol, zkratka	Jednotka	Význam
a	[°]	azimut
A	[m ²]	plocha
A	[-]	součinitel
AM		charakterizuje vliv atmosféry
c	[m.s ⁻¹]	rychlost
CF	[Kč]	tok hotovosti (cash flow)
e	[C]	elementární náboj
E	[Wh, kWh]	energie
EFF	[%]	účinnost fotovoltaických článků
f	[-]	přepočtový faktor
F	[m ⁻²]	fotonový tok
FF	[%]	faktor plnění
FVF		fotovoltaická fasáda
FVI		fotovoltaická instalace
FVS		fotovoltaický systém
h	[J.s]	Planckova konstanta
h	[°]	výška Slunce nad obzorem
H	[m]	nadmořská výška
I	[A]	elektrický proud
I	[W.m ⁻²]	intenzita slunečního záření
IMSFF		indikační a měřicí systém fotovoltaické fasády
IN	[Kč]	investice
k	[-]	směrnice
k _B	[J.K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
KM		kontrolní měření
N ₀	[-]	počet přetečení vnitřní paměti elektroměru
p	[-]	diskontní činitel
P	[W]	výkon
PC		počítač
q	[mA]	posun pracovní nuly pyranometru

r	[-]	albedo
R_p	[-]	výkonový poměr
T	[rok]	doba, doba návratnosti
T	[K]	termodynamická teplota
U	[V]	elektrické napětí
U	[Kč]	změna provozních nákladů
Y_{PVS}	[kWh/kW _P]	výtěžnost
Z	[-]	součinitel znečištění atmosféry
α	[°]	úhel sklonu osluněné plochy
α	[%/°C]	teplotní koeficient
γ	[°]	odchylka paprsků od normály plochy
ε	[-]	přepočtový faktor
η	[%]	účinnost
λ	[m]	vlnová délka
τ	[h]	doba slunečního svitu
Δ		rozdíl, difference
Δt	[°C]	teplotní rozsah

Index

Význam

c	celkový
d	diskontovaná, reálná
EL	základní přepočtená hodnota vyrobené elektrické energie
D	difúzní, denní
DOP	dopadající
GEN	generovaný, vyrobený
h	horizontální
I	elektrický proud
IO	transformovaný měniči napětí, za měniči napětí
m	maximální, měřený
M	měsíční
P	přímý, výkon, zahrnuje vliv polohy a orientace
P2F	přepočtený dvěma faktory

P3F	přepočtený třemi faktory
R	roční
sl.	sluneční
S	střední, měnič napětí
t	teplota
tj.	to je
tzn.	to znamená
T	zahrnuje vliv použité techniky
TEOR	teoretický
U	elektrické napětí
VYR	vyrobitelný
ZAZ	zaznamenaná hodnota vyrobené elektrické energie
V	elektrická vedení a spojovací prvky
τ	zahrnuje vliv klimatických podmínek

1 ÚVOD

Ne vždy si lidé, po přírodě nejvýznamnější utvářecí síla této planety, uvědomují svůj vliv na okolní prostředí, přírodu a planetu vůbec. Právě antropogenní činnost si nese své důsledky, které s plynoucím časem vyvolávají stále větší obavy nás, lidí. Chceme-li být schopni trvale udržovat nebo ještě dále zlepšovat svou životní úroveň, musíme rozvíjet takové aktivity, které nebudou v rozporu s funkcí ekosystému planety Země a budou respektovat omezenost fosilních zdrojů energie. Sama planeta Země prochází již miliony let neustálým vývojem a zdá se, že právě v období teplotního růstu a pozvolné změny klimatu není nejmoudřejší planetu v tomto trendu podporovat.

Zatímco prastaré národy, příkladem mohou být staří Egyptané, dokázaly rozpoznat pravou sílu a skutečný význam životadárného Slunce, dnešní civilizace se stále ne a ne vymanit z okovů relativního pohodlí spojeného s využíváním uhlí, ropy a zemního plynu. Sluneční energie, skladovaná miliony let do hmatatelné podoby jako uhlí, ropa či zemní plyn, je lidskou společností uvolňována značnou rychlostí. Takto je docela možné, že přelom 20. a 21. století byl poslední, kdy ještě byly tyto fosilní energetické zdroje rozumně dostupné. A přece právě sluneční energie, kterou k naší planetě vytrvale Slunce posílá, by mohla nakonec překonat nedůvěru lidí a postupně proniknout do oblastí společenského života, ve kterých dnes hraje prim spalování nerostného bohatství, jež by spíše mělo sloužit jako materiálový a nikoliv energetický zdroj.

Z mnoha druhů energie, které využíváme, je nejušlechtlejší energie elektrická. Mezi její nesporné výhody patří snadná měřitelnost, relativně vysoká hustota, schopnost dodávek tzv. just in time a nízká ekologická zátěž životního prostředí. Bohužel, poslední výhoda se vztahuje pouze na její spotřebu. Není jednoduché zvládnout výrobu této důležité a nenahraditelné formy energie environmentálně vyhovujícím způsobem. Budeme-li se zabývat možnostmi jak vyřešit jednoduchou rovnici, kde na jedné straně je požadovaná elektrická energie a na druhé straně environmentálně šetrné řešení, dospějeme k závěru, že je třeba využívat energie Slunce, a to energie, dopadající na povrch planety Země v současnosti. Nabízí se tak využití sluneční energie přímo nebo prostřednictvím přírodních dějů, které díky sluneční energii na planetě Zemi probíhají.

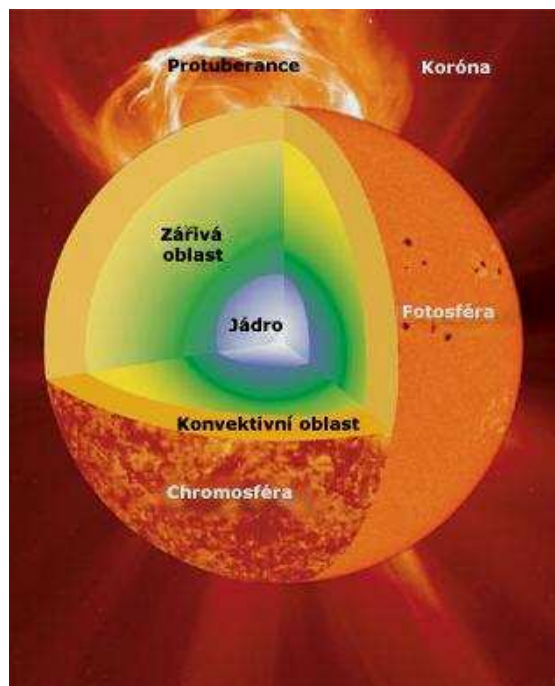
Tato diplomová práce se zabývá jedním ze způsobů environmentálně šetrné výroby elektrické energie, a to přímou přeměnou energie slunečního záření, využívající fotovoltaického jevu. Cílem diplomové práce je experimentální stanovení účinnosti přeměny energie slunečního záření na fotovoltaické fasádě, vyhodnocení zjištěných skutečností, posouzení a vyhodnocení použitého zařízení fotovoltaické fasády a navržení vhodných optimalizačních opatření. Diplomová práce se dále zabývá porovnáním fotovoltaické fasády, instalované na Technické univerzitě v Liberci, s obdobnými aplikacemi instalovanými na dalších univerzitách v České republice v rámci programu Evropské unie s názvem PV Enlargement – Contract No. NNE5/2001/736.

2 ČÁST REŠERŠNÍ

2.1 SLUNEČNÍ ENERGIE

2.1.1 Fyzikální podstata slunečního záření

Slunce je jedinou hvězdou Sluneční soustavy a je milionkrát větší než Země. Je tvořeno žhavými plyny – plazmatem, složeným převážně z vodíku a hélia. Teplota jádra Slunce dosahuje 15 000 000 °C. Zdrojem veškeré energie jsou termonukleární reakce, probíhající v jádru Slunce. Je paradoxní, že se nejvíce právě odpůrci jaderné energie dožadují využívání energie, která je uvolňována při jaderných procesech. Produkty termonukleárních reakcí, tj. fotony o energii tvrdého rentgenova záření, postupují nejprve zářivou oblastí a poté jsou nesený konvektivní vrstvou směrem k povrchu Slunce – fotosféře, která již zdaleka nedosahuje teploty jádra Slunce. V místech s menší intenzitou magnetického pole dosahuje teplota viditelného povrchu Slunce – fotosféry až 6 000 °C. Tam, kde je intenzita magnetického pole větší, je teplota fotosféry řádově okolo 4 000 °C. Nad fotosférou je řídká oblast zvaná chromosféra a nad ní koróna. Zde je teplota opět značná, v koróně dosahuje až 3 000 000 °C.



Obr. 2.1 Struktura Slunce

Energeticky lze popsat pochody na Slunci následovně. Při probíhajících termonukleárních reakcích se při vzniku jednoho atomu hélia uvolní vazebná energie 28 MeV. Přeměň probíhá 10^{38} každou sekundu, což představuje uvolněnou energii přibližně $3,8 \cdot 10^{26}$ J. Zářivý výkon Slunce je tedy $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Na cestě z jádra k povrchu je energie fotonů vlivem interakcí posouvána směrem k menším hodnotám, což se projevuje i posunem spektra emitovaných fotonů. Z povrchu Slunce tak jsou emitovány fotony vlnových délek od 10^{-10} m do 10^3 m. Pro přenos tepelné energie jsou významné pouze fotony v rozmezí vlnových délek 0,2 až 3 μm .

Důležitost Slunce pro Zemi a tedy i pro fotovoltaiku je ve vzdálenosti Země od Slunce. Měřeno pozemskými délkovými měřítky je vzdáleno 150 milionů km, což v astronomických jednotkách představuje přibližně 8 světelných minut. Promítneme-li záření emitované Sluncem na plochu o poloměru střední vzdálenosti Země od Slunce, dojdeme k hodnotě velikosti hustoty zářivého toku – intenzitě slunečního záření I_0 , která je přibližně 1365 W/m^2 . Této hodnotě se rovněž říká sluneční konstanta a je důležitá pro teoretické výpočty ve všech oblastech využívání energie slunečního záření.

Pozn.: Protože Země neobíhá kolem Slunce po kružnici ale po eliptických drahách, nabývá hustota zářivého toku hodnot v rozmezí 1345 W/m^2 (1. července) až 1438 W/m^2 (1. ledna). [7]

2.1.2 Matematická teorie

Pro praktické využití energie slunečního záření bylo nutné sestavit matematickou teorii, která dokáže popsat chování slunečního záření v atmosféře a bude rovněž schopna zohlednit polohu Slunce i solární instalace. Tímto problémem se v České republice zabýval profesor Cihelka, jehož teorie byla v diplomové práci použita.

Teoretických popisů, zabývajících se výpočtem energie slunečního záření dopadajícího na Zemi, je mnohem více. Jedná se např. o metodu Ångströmovu (Martínez-Lozano et al., 1984), Klabzubovu (Klabzuba et al., 2000), Hargreavesovu (Hargreaves et al., 1985), Winslowovu (Winslow et al., 2001) a Supitovu (Supit, Van Kappel, 1998).

Zkrácený přehled matematického popisu teorie profesora Cihelky

Intenzita slunečního záření na okraji zemské atmosféry je dána hodnotou sluneční

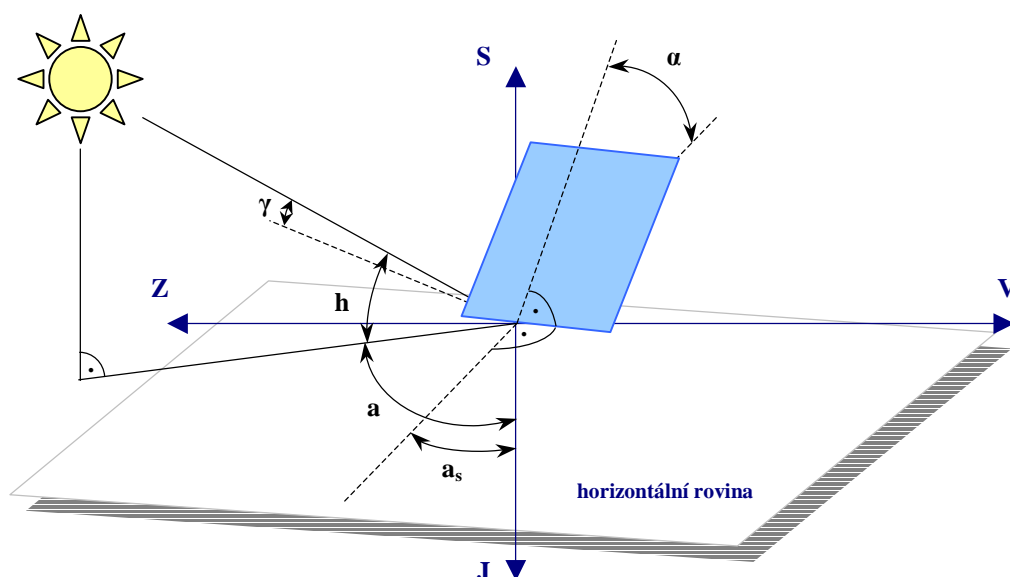
konstanty I_0 . Průchodem fotonů zemskou atmosférou dochází vlivem interakcí s částicemi atmosféry ke zmenšení hodnoty intenzity slunečního záření. Zmenšení charakterizuje součinitel znečištění atmosféry Z [-]. Nabývá hodnot od 2 do 8, přičemž nejběžnější hodnoty jsou v rozmezí 2 až 5. Sluneční záření dopadající na zemský povrch je možné charakterizovat pomocí dvou jeho složek, a to složky přímé a difúzní.

Intenzita přímého slunečního záření I_P po průchodu atmosférou na obecně položenou plochu je dána vztahem

$$I_P = I_0 \cdot A^{-Z} \cdot \cos(\gamma), \quad (2.1)$$

kde: A – součinitel, který závisí na výšce Slunce nad obzorem,
 γ – úhel dopadu paprsku na osluněnou plochu (odchylka od normály plochy).

Pozn.: Vzhledem k proměnné poloze Slunce nad obzorem v závislosti na čase je nutné znát jeho okamžitou výšku nad obzorem h [°] a jeho okamžitý azimut a [°]. Dále je nutné znát nadmořskou výšku osluněné plochy H [m], úhel jejího sklonu od vodorovné roviny α [°] a azimut normály osluněné plochy (měřený od jihu) a_s [°].



Obr. 2.2 Prostorové zobrazení dopadu slunečního záření

Intenzita difúzního záření I_D je dána vztahem

$$I_D = \frac{1 - \cos(\alpha)}{2} \cdot I_{Dh} + \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \cdot r \cdot (I_{Ph} - I_{Dh}), \quad (2.2)$$

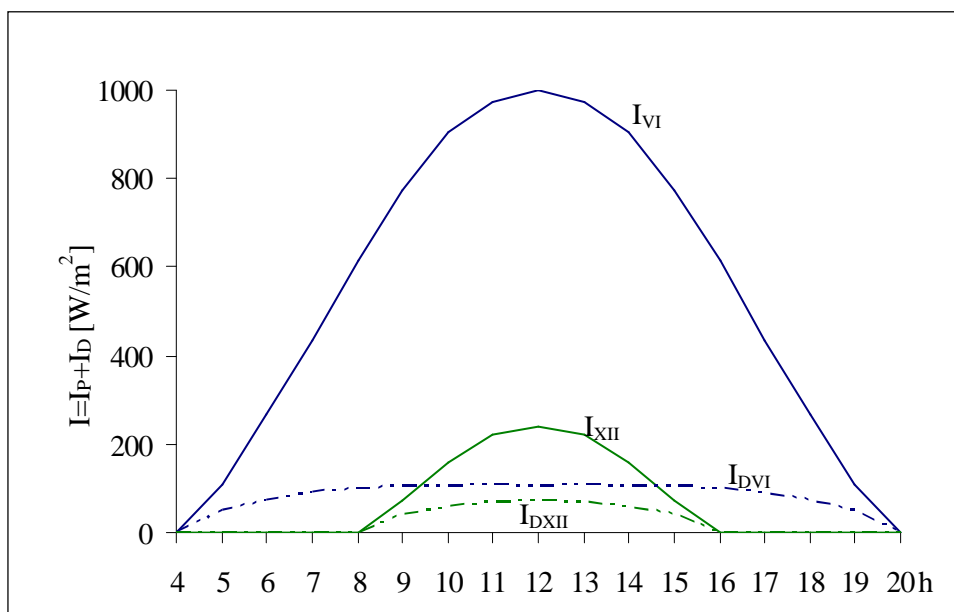
kde: r – reflexní schopnost okolních ploch, tzv. albedo ($r = 0,15$ až $0,25$),

I_{Ph} – intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu,

I_{Dh} – intenzita difúzního slunečního záření na vodorovnou plochu.

Intenzita celkového slunečního záření I_C se skládá z přímého a difúzního záření. Intenzita celkového záření je dána vztahem

$$I_C = I_P + I_D. \quad (2.3)$$



Obr. 2.3 Intenzita celkového slunečního záření na vodorovnou plochu

Energie dopadající na osluněnou plochu je přímo úměrná průběhu intenzity celkového slunečního záření za dobu teoretického slunečního svitu. Její teoretickou hodnotu lze vypočítat ze vztahu

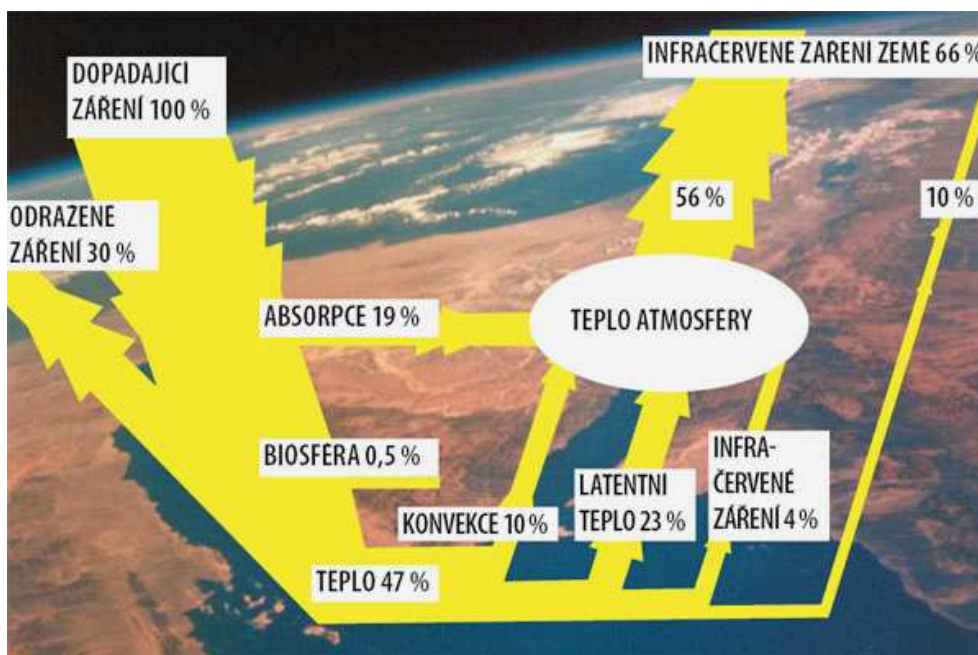
$$E_{DOPTEOR} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I \cdot d\tau. \quad (2.4)$$

kde: τ – teoretická doba slunečního svitu.

2.1.3 Sluneční energie v praxi

Na Zemi dopadá ze Slunce jen zlomek jeho zářivého výkonu, tj. přibližně $180 \cdot 10^{12}$ W, přesto se však jedná o hodnotu řádově 2 000krát větší než potřebuje celá biosféra a zároveň 14 000krát větší než spotřebovává v současnosti celé lidstvo. Je to dostatečné množství na to, aby dokázalo “ohřát” Zemi z teploty -263 °C, což je teplota dosažitelná pouze geotermální energií Země, na průměrnou teplotu 15 °C. [5]

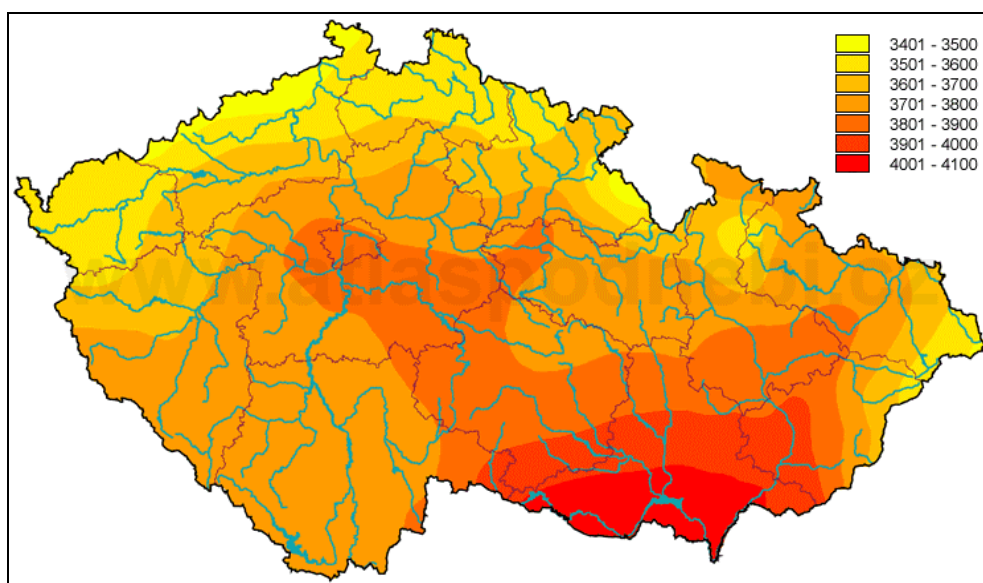
Toky energií jsou dobře patrné z energetické bilance Země. Z dopadajícího slunečního záření se přibližně třetina odrazí v horních vrstvách atmosféry zpět do vesmíru jako krátkovlnné záření, přibližně pětina je atmosférou absorbována a společně s teplem ze Zemského povrchu je vyzářena do vesmíru jako dlouhovlnné záření. Tím se uzavírá bilance mezi vstupujícím zářením a vystupujícím zářením.



Obr. 2.4 Energetická bilance Země

Jak již bylo uvedeno výše, průchodem fotonů zemskou atmosférou dochází vlivem interakcí s částicemi atmosféry ke zmenšení hodnoty intenzity slunečního záření. Při jasném slunečném dni tak intenzita slunečního záření dosahuje maximálních hodnot okolo $1\,000$ W/m², a to téměř nezávisle na poloze na Zemském povrchu. Vzhledem k oblačnosti a s ohledem na střídání dne a noci dosahuje intenzita slunečního záření běžných hodnot v rozmezí 0 W/m² až $1\,000$ W/m². [1]

Při oblačném dni přítom intenzita slunečního záření, zde jen difúzní složka, zřídka kdy převyšuje hodnotu 100 W/m^2 . Za rok tak dopadne v zeměpisných šířkách České republiky na metr čtvereční Zemského povrchu jen něco okolo 1 000 kWh slunečního záření. Dopadající sluneční záření je měřeno, údaje jsou zaznamenávány a jsou používány rovněž k sestavení tzv. slunečních map, které slouží pro lepší přehled sluneční bilance v jednotlivých lokalitách.



Obr. 2.5 Sluneční mapa [$\text{MJ/m}^2 \cdot \text{rok}$]

2.2 FOTOVOLTAIKA A JEJÍ VYUŽITÍ

2.2.1 Fotovoltaické jevy

Fotovoltaický jev byl pozorován již v roce 1839, v roce 1873 byla poprvé zjištěna změna vodivosti selenu při jeho osvětlení a v roce 1876 byl poprvé sestrojen fotočlánek s hradlovou vrstvou. Teoreticky však nešlo popsat fotovoltaický jev do doby vypracování kvantové teorie. Pomocí této teorie, zejména pak objevu zákona fotovoltaického efektu, který vypracoval Albert Einstein a za který obdržel v roce 1921 Nobelovu cenu, lze jev nejen vysvětlit a popsat, ale i zařízení, využívající fotovoltaického jevu, dále zdokonalovat. [4]

Fotovoltaické články jsou v podstatě velkoplošné polovodičové diody P-N. Po připojení napětí mezi spodní a horní elektrodu lze určit hodnotu proudu tekoucího článkem pomocí Shockleyho diodové rovnice

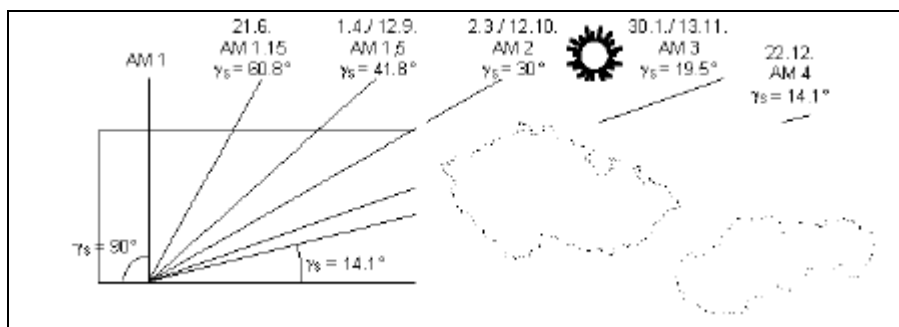
$$I = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{eU}{k_B T} \right)} - 1 \right]. \quad (2.5)$$

kde: I_0 – saturační proud diody, e – elementární náboj, U – přiložené napětí,
 k_B – Boltzmannova konstanta, T – termodynamická teplota.

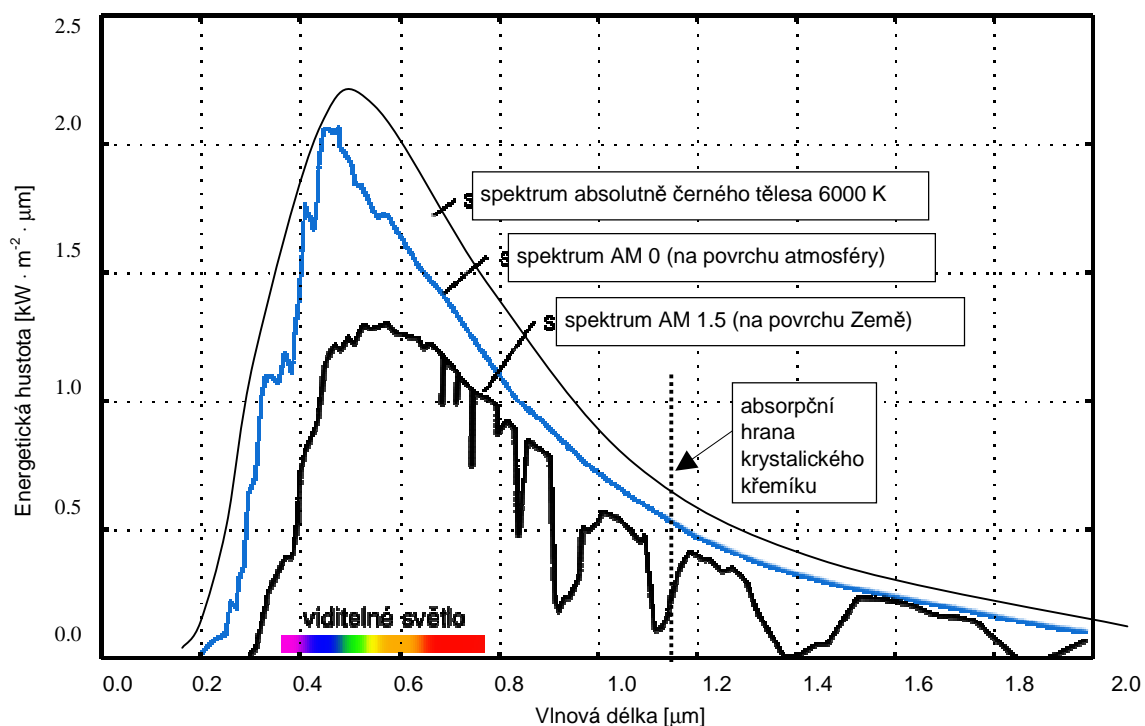
Při osvětlení povrchu článku je generován proud I_L , který je úměrný intenzitě dopadajícího záření. Tento generovaný proud má záporné znaménko, tzn. je dodáván do vnějšího elektrického obvodu. Celkový proud tekoucí fotovoltaickým článkem je dán rozdílem osvětlením generovaného proudu I_L a proudu I , určeného diodovou rovnicí. Lze jej tedy určit z rovnice

$$I_C = I_L - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{eU}{k_B T} \right)} - 1 \right]. \quad (2.6)$$

Problémem fotovoltaických článků je jejich poměrně nízká účinnost EFF . Ta je způsobena zejména selektivní citlivostí na spektrum dopadajícího slunečního záření a vymezuje tak spektrum, účastníci se fotovoltaické přeměny. Toto spektrum je omezeno absorpční hranou polovodiče, tj. záření s vyšší vlnovou délkou než je záření odpovídající hodnotě absorpční hrany nemůže být v polovodiči využito.

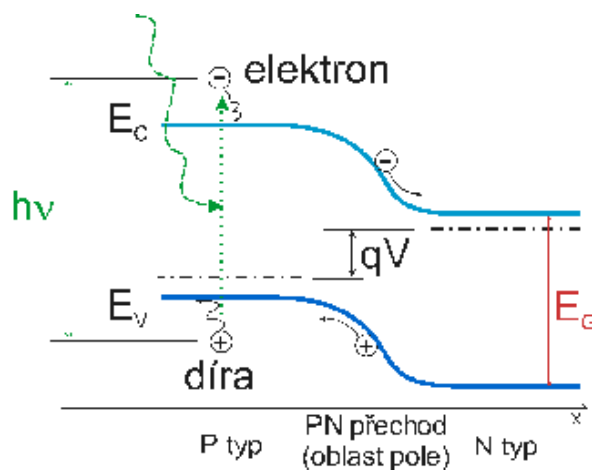


Obr. 2.6 Charakteristika slunečního spektra hodnotou AM



Obr. 2.7 Sluneční spektrum (AM 1,5)

Spektrum slunečního záření se mění s délkou průchodu zemskou atmosférou. Aby nedocházelo ke stanovení vlastností fotovoltaických článků při rozdílných podmínkách, jsou stanoveny tzv. standardní technické podmínky. Jednou z nich je charakteristika složení spektra slunečního záření označovaná dvoupísmennou zkratkou AM (air mas) a číselnou hodnotou. Číselná hodnota představuje kosekans úhlu dopadu slunečního záření na zemský povrch.



Obr. 2.8 Energetické pásové schéma P-N přechodu

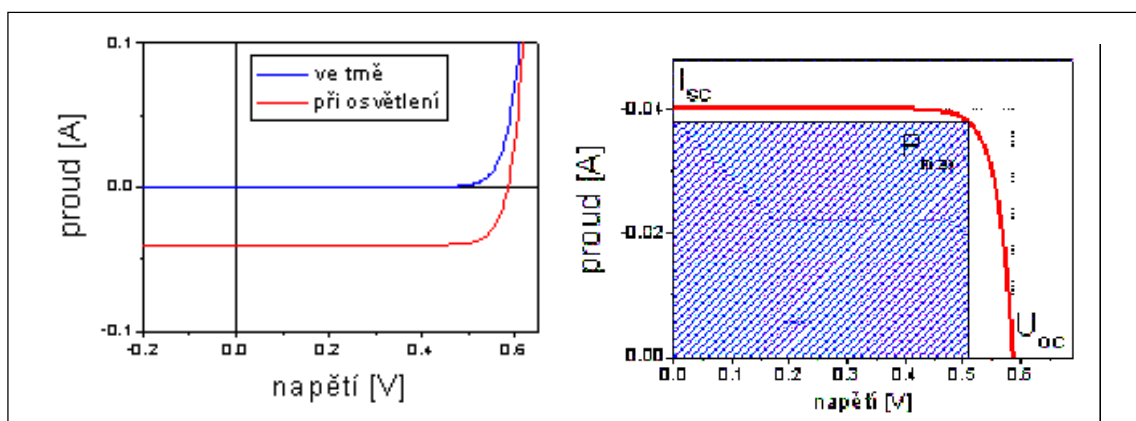
Fotony s energií menší než je šířka zakázaného pásu polovodiče, se fotovoltaické přeměny neúčastní vůbec, zatímco fotony s energií větší než je šířka zakázaného pásu polovodiče excitují elektron z valenčního pásu. Excitovaný elektron relaxuje na dno vodivostního pásu a díra po elektronu relaxuje na vrchol valenčního pásu. Pro krystalický křemík je šířka zakázaného pásu 1,1 eV.

Důležitým faktorem je rovněž ztrátová transformace nadbytečné energie vysokoenergetických fotonů v teplo, kterým se článek ohřívá. Teoretická mez využití energie spektra dopadajícího slunečního záření, energetické účinnosti EFF , je pro krystalický křemík jen okolo 30 %. [3]

2.2.2 Fotovoltaický článek

Základním stavebním kamenem fotovoltaické architektury je fotovoltaický článek. Fyzikální popis dějů na fotovoltaickém článku byl podán v předchozí kapitole. Je však důležité znát i další vlastnosti fotovoltaických článků a systémů z nich tvořených.

V současnosti používané články jsou tvořeny buď jedním nebo několika P-N přechody. V případě použití více P-N přechodů se jednotlivé vrstvy skládají z polovodičů s odlišnou šířkou zakázaného pásu. Fotogenerovaný proud I_L je možné zobrazovat ve V-A charakteristice (obr. 2.9). Typicky se tato charakteristika kreslí pouze ve 4. kvadrantu, a to z důvodu odlišných vlastností fotovoltaického článku při dopadu slunečního záření, kdy dochází k posunu charakteristiky právě do 4. kvadrantu.



Obr. 2.9 V-A charakteristika fotovoltaického článku

Charakteristickými vlastnostmi fotovoltaických článků je napětí na prázdko U_{OC} a proud na krátko I_{SC} . Výkon článku je dán součinem napětí a proudu dodávaného do vnějšího elektrického obvodu, tj. obecným vztahem

$$P = U \cdot I. \quad (2.7)$$

Pro výkon poskytovaný fotovoltaickým článkem je důležitá poloha pracovního bodu P_o , která je ovlivňovaná mnoha faktory, zejména spotřebičem el. energie. Pro maximální poskytovaný výkon by měl být pracovní bod P_o totožný s bodem P_m , tj. spotřebič musí umožňovat fotovoltaickému článku pracovat s napětím, odpovídajícím při daných provozních podmínkách právě hodnotě U_m , určené polohou bodu P_m .

Důležitou charakteristikou fotovoltaického článku je faktor plnění FF . Tento faktor vypovídá o kvalitách fotovoltaického článku, přičemž platí, že čím větší hodnota, tím vyšší kvalita článku. Faktor plnění je dán vztahem

$$FF = \frac{P_m}{(I_{SC} \cdot U_{OC})} = \frac{(I_m \cdot U_m)}{(I_{SC} \cdot U_{OC})}. \quad (2.8)$$

Pro krystalický křemíkový fotovoltaický článek dosahuje faktor plnění FF hodnot asi 0,7 až 0,8. Nejdůležitější charakteristikou fotovoltaického článku je jeho energetická účinnost EFF . O teoretických hodnotách účinnosti bylo psáno v předchozí kapitole, matematicky je možno hodnotu energetické účinnosti EFF stanovit dle vztahu

$$EFF = \frac{I_m \cdot U_m}{A \cdot \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot \left(\frac{h \cdot c}{\lambda} \right) \cdot d\lambda}, \quad (2.9)$$

kde: A – plocha článku, $F(\lambda)$ – tok fotonů s vlnovou délkou v intervalu $(\lambda, \lambda + \delta\lambda)$,
 h – Planckova konstanta, c – rychlost fotonů, λ – vlnová délka.

Současné krystalické křemíkové fotovoltaické články dosahují v laboratorních podmínkách hodnot okolo 24 %, sériově vyráběné krystalické křemíkové fotovoltaické články dosahují účinnosti do 15 %.

Pozn.: Parametry fotovoltaických článků se uvádí pro standardní technické podmínky, tj. intenzitu slunečního záření 1000 W/m^2 , sluneční spektrum AM 1,5 a teplotu 25°C .

Fotovoltaické články lze členit dle použité materiálové struktury na:

- objemové krystalické materiály,
- tenkovrstvé deponované materiály.

Objemové krystalické materiály

Monokrystalický křemík – nejčastěji v současnosti používaná materiálová struktura.

Hodnota *EFF* laboratorních článků až 24 %, sériově vyráběných článků až 15 %.

Polykrystalický křemík – nárůst použití díky nižší výrobní ceně. Hodnota *EFF* laboratorních článků až 18 %, sériově vyráběných článků až 14 %.

Hranou definovaný film (EFG) – téměř monokrystalický křemíkový pásek dělený převážně lomem (nižší materiálové ztráty proti řezu). Hodnota *EFF* nezjištěna.

Galium Arsenid (GaAs) – slitinový polovodičový materiál typu X_3Y_5 s vysokou účinností a cenou. Hodnota *EFF* laboratorních článků větší než 25 %, pro koncentrované sluneční záření až 28 % a při použití několika polovodičových přechodů až 30 %. Hodnota *EFF* sériově vyráběných nezjištěna.

Výhody: rozšířenost křemíkových materiálů, vyšší účinnost sériově vyráběných článků.

Nevýhody: vyšší výrobní i materiálové náklady (při získávání čistého křemíku).

Tenkovrstvé deponované materiály

Amorfní křemík (a-Si:H) – výroba celých modulů najednou, rozšíření ve spotřební elektronice a jako náhrada prosklených ploch. Hodnota *EFF* laboratorních článků až 10 %, sériově vyráběných článků 5 až 7 %.

Kadmium Telurid (CdTe) – tenkovrstvý film polykrystalického materiálu. Hodnota *EFF* laboratorních článků až 16 %, sériově vyráběných článků 8 %.

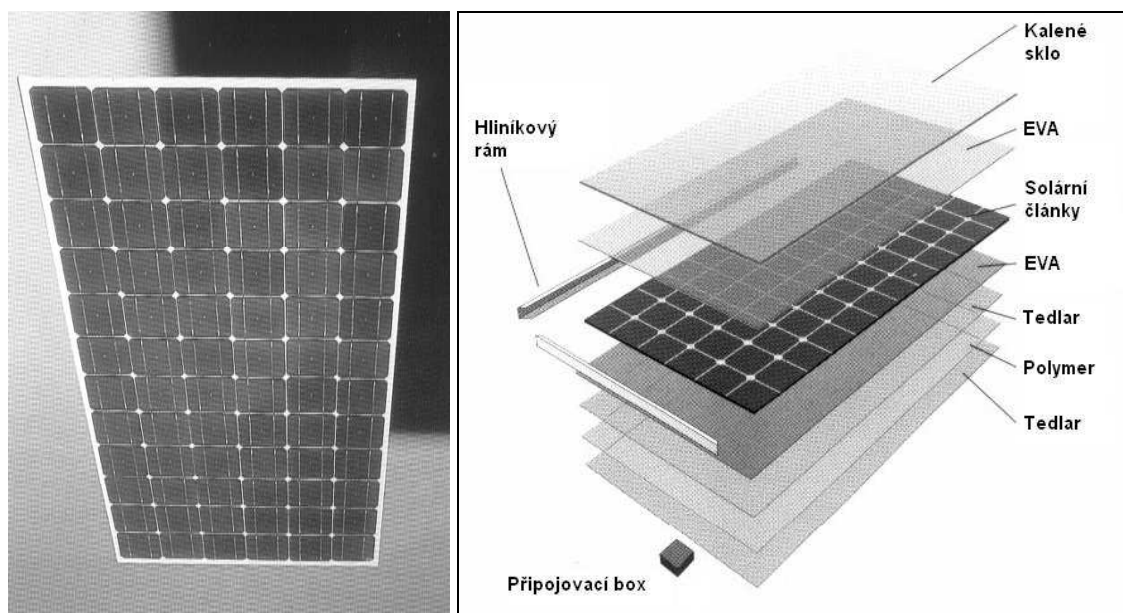
Copper Indium Diselenide ($CuInSe_2$) – tenkovrstvý film polykrystalického materiálu. Hodnota *EFF* laboratorních článků až 18 %. Hodnota *EFF* sériově vyráběných nezjištěna.

Výhody: v případě křemíkových článků rozšířenost křemíkových polovodičových materiálů, díky menší materiálové spotřebě nižší materiálové náklady.

Nevýhody: v případě amorfního křemíku degradace materiálu po expozici na slunečním záření, nižší účinnost článků.

2.2.3 Fotovoltaické moduly

Fotovoltaické moduly jsou sestavovány sériovým nebo paralelním elektrickým propojením více fotovoltaických článků z důvodů, které vyplývají s ohledem na jejich praktické použití. Jen velmi malému počtu aplikací by vyhovoval jeden fotovoltaický článek. V praxi je potřeba dosáhnout vyšších napětí, zpravidla 12 nebo 24 V na jeden fotovoltaický modul, a zároveň uspokojit potřeby uživatelů dostatečným výkonem. Aby bylo možné s fotovoltaickými moduly bezpečně manipulovat a zároveň je chránit proti nepřízní klimatických podmínek, jsou fotovoltaické články vkládány do mechanicky pevných a odolných konstrukcí. Fotovoltaické moduly však musí splňovat i jiné požadavky, kterými jsou přijatelná cena samotného modulu i cena montáže a estetické řešení, ovlivňující vzhled budovy. Na (obr. 2.10) jsou dobře viditelné všechny vrstvy 72článekového fotovoltaického modulu s hliníkovým rámem.



Obr. 2.10 Fotovoltaický modul

2.2.4 Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické moduly jsou schopny dodávat pouze stejnosměrný proud při napětí 12 nebo 24 V na jeden modul. Pro fotovoltaické aplikace je ve většině případů nutné zapojit fotovoltaické moduly do sestav, které jsou potom schopny vyhovět požadavkům

uživatele nejen pracovním napětím, ale i dostatečným elektrickým výkonem. Samotné sestavy fotovoltaických modulů jsou pro praktické aplikace nedostatečné a je nutné je doplnit o další zařízení do tzv. fotovoltaických systémů. Mimo spotřebiče jsou to prvky jako regulační zařízení, akumulátorové baterie, měnič, indikační a měřicí přístroje. Podle praktické aplikace a použitého zařízení se fotovoltaické systémy člení na

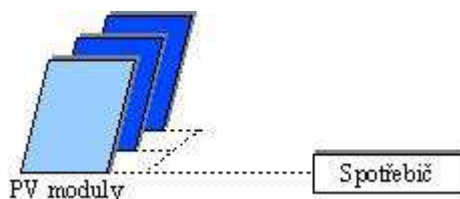
- autonomní (grid-off) systémy,
- systémy připojené na veřejnou rozvodnou síť (grid-on).

Autonomní (grid-off) systémy

Jsou aplikovány v místech, kde není vybudována elektrická přípojka a kde není možné, účelné a nebo efektivní elektrickou přípojku budovat. Grid-off systémy dosahují špičkových výkonů v desítkách kilowattů. Podle zapojení a použitých zařízení se člení na

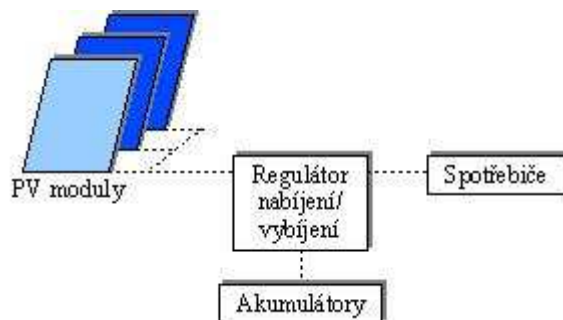
- grid-off systémy s přímým napojením,
- grid-off systémy s akumulací elektrické energie,
- grid-off hybridní systémy.

Grid-off systémy s přímým napojením – elektrické spotřebiče jsou funkční pouze v případě dostatečné intenzity dopadajícího slunečního záření. Systémy neobsahují akumulaci přebytečné vyrobené energie.



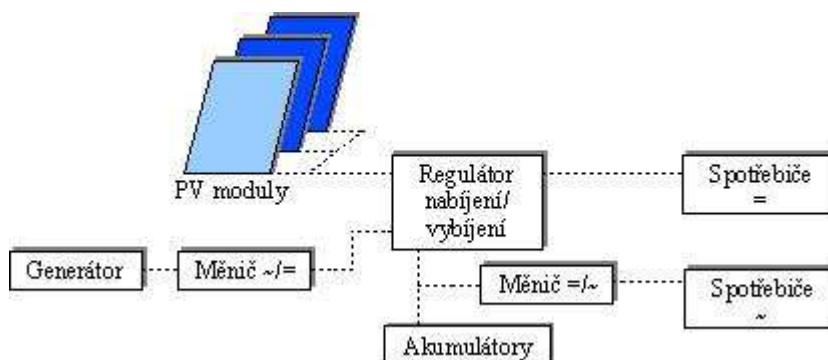
Obr. 2.11 Grid-off systém s přímým napojením

Grid-off systémy s akumulací elektrické energie – jsou schopny akumulovat přebytečnou vyrobenou energii pro období bez dostatečné intenzity dopadajícího slunečního záření. Tyto systémy jsou vybaveny regulátorem nabíjení a akumulátorovými bateriemi. Pro rozšířené využití vyrobené elektrické energie bývají vybaveny rovněž měničem napětí.



Obr. 2.12 Grid-off systém s akumulací elektrické energie

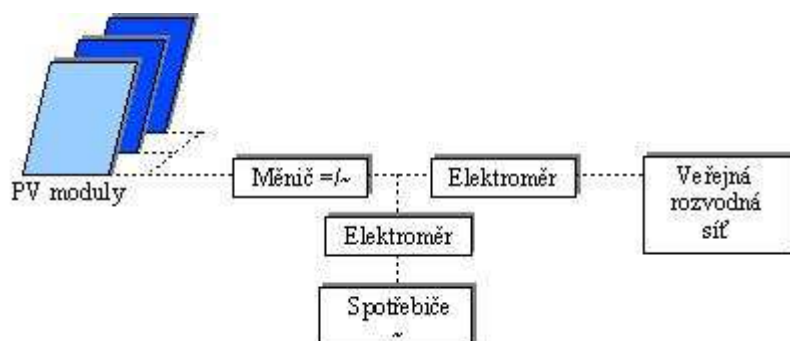
Grid-off hybridní systémy – jsou systémy s akumulací elektrické energie, pro období bez slunečního záření jsou vybaveny sekundárním zdrojem elektrické energie.



Obr. 2.13 Grid-off hybridní systém

Systémy připojené na veřejnou rozvodnou síť (grid-on)

Jsou aplikovány v místech s vybudovanou elektrickou přípojkou. V případě dostatečné intenzity dopadajícího slunečního záření jsou elektrické spotřebiče v budově napájeni elektrickou energií z fotovoltaického systému, v opačném případě jsou elektrické spotřebiče v budově napájeni elektrickou energií z veřejné rozvodné sítě. Tyto systémy rovněž umožňují dodávku přebytečné vyrobené energie do veřejné rozvodné sítě a jsou-li vybaveny akumulátorovými bateriemi, mohou přebytečnou vyrobenou energii zužít v období s nedostatečnou intenzitou dopadajícího slunečního záření. Grid-on systémy dosahují špičkových výkonů ve stovkách kilowattů.



Obr. 2.14 Grid-on systém s přímým napojením

2.2.5 Prvky FVS

Fotovoltaické systémy jsou kromě fotovoltaických modulů vybaveny důležitými zařízeními. Mimo elektrického spotřebiče jsou to prvky jako kabelové rozvody, jističe, regulační zařízení, akumulátorové baterie, měniče napětí, indikační a měřicí přístroje, sledovače Slunce, sekundární zdroje elektrické energie, atd. Z důvodu značně širokého rozsahu používaných prvků zde budou uvedeny jen nejdůležitější z nich.

Akumulátorové baterie

Uplatňují se zejména v grid-off aplikacích. Musí splňovat řadu často protichůdných požadavků, z nichž nejdůležitější je hledisko ceny. Právě z ekonomických důvodů jsou nejvíce používány olovnaté akumulátorové baterie. Základní vlastnosti dvou typů používaných akumulátorových baterií jsou uvedeny v (tab. 2.1).

Tab. 2.1 Vlastnosti akumulátorů pro solární použití

Typ akumulátoru	Napětí [V]	Kapacita C_{100} [Ah]	Kapacita [Wh]	Samovybíjení [%/měsíc]	Počet cyklů
S kapalným elektrolytem	12	54 - 260	600 - 3000	2 - 10	450 - 600
Gelový	12	60 - 230	700 - 2800	2 - 3	870 - 2100

Regulátory nabíjení

Uplatňují se zejména v grid-off aplikacích, kde zastupují mnoho funkcí. Základními funkcemi je řízení procesu nabíjení a vybíjení ve vztahu k optimálnímu chodu systému. Regulátory jsou většinou určeny pro jedno jmenovité napětí, kvalitnější je možné připojit na obě napětí (12, 24 V). Dalšími vhodnými funkcemi jsou ochrana regulátoru proti přepólování, ochrana proti zpětnému vybíjení akumulátorů, ochrana akumulátoru před hlubokým vybitím (u olověného akumulátoru okolo 10,5 V), teplotní kompenzace regulačních napětí a signalizace stavu systému.

Měniče napětí

Uplatňují se zejména u grid-on systémů, zastoupení ale mají i v grid-off aplikacích. Jejich úkolem je převést stejnosměrné napětí, zpravidla 12 nebo 24 V, ale i mnohem vyšší, na střídavé napětí veřejné rozvodné sítě 230 V/50 Hz. Jednotlivé měniče napětí se odlišují průběhem výstupního proudu, který bývá u nejjednodušších typů obdélníkový, kvalitnější měniče napětí dávají lichoběžníkový průběh výstupního proudu a nejkvalitnější jsou schopny dávat sinusový průběh výstupního proudu. Důležitou vlastností je stabilizace pracovního bodu fotovoltaických článků. Z energetického hlediska je nejdůležitější vlastností účinnost měniče napětí. Dobrý měnič napětí by měl vykazovat poměrně strmý nárůst účinnosti již při malých výkonech a v rozmezí 10 až 100 % výkonu by měla být účinnost udržována na maximálních hodnotách. Je dobré, je-li použit měnič napětí s vysokou hodnotou tzv. evropské účinnosti. Tato účinnost je stanovena jako vážený průměr účinností zjištěných při vytíženích v rozsahu 5 až 100 % jmenovitého výkonu měniče napětí a dobře tak vyhovuje středoevropským klimatickým podmínkám.

Tab. 2.2 Teoretická účinnost grid-on fotovoltaického systému

Prvek systému	Maximální účinnost [%]	Průměrná účinnost [%]
Fotovoltaická sestava (pole)	15,0	12,0
Elektrická vedení	> 99,0	99,0
Měnič napětí	> 90,0	85,0

3 PROJEKT PV ENLARGEMENT

PV Enlargement je mezinárodní projekt, demonstrující evropský závazek pro zlepšení energetické efektivity a rentability fotovoltaických systémů a pro povzbuzení rozvoje evropského trhu fotovoltaických systémů. V rámci tohoto projektu bylo ve spolupráci s firmou SOLARTEC s.r.o. a za přispění SFŽP realizováno v letech 2002 až 2004 pět fotovoltaických instalací na technických vysokých školách v České republice. Jednou z nich je právě TU v Liberci se svou fotovoltaickou fasádou.

4 FOTOVOLTAICKÁ FASÁDA

4.1 POPIS FOTOVOLTAICKÉ FASÁDY

Fotovoltaická fasáda představuje instalaci systému připojeného na veřejnou rozvodnou síť, tedy tzv. grid-on systému. Jedná se však o modifikaci, kdy vyrobená elektrická energie z fotovoltaické fasády je využívána pro napájení školních elektrických spotřebičů. Zvolený systém nakládání s vyrobenou elektrickou energií požaduje zajištění spotřeby veškeré vyrobené elektrické energie vlastníkem instalace. Tomuto schématu odpovídá výkup elektrické energie, který je realizován prostřednictvím tzv. zelených bonusů.

Fotovoltaická fasáda je instalována na dvou štítových zdech budovy F, orientovaných jihovýchodně. Základní údaje o instalaci jsou uvedeny v (tab. 4.1).



Obr. 4.1 Pohled na fotovoltaickou fasádu

Tab. 4.1 Základní údaje o fotovoltaické fasádě

Místo instalace	TU v Liberci, budova F
Zeměpisná poloha instalace	50°46' s.š., 15°04' v.d.
Azimut	≈ -14°
Sklon instalace (horizontální = 0°)	90°
Instalovaný špičkový elektrický výkon	18,71 kW _P
Maximální provozní elektrický výkon	15,00 kW _e

Pozn.: Azimut je uveden ve smyslu: jih = 0°, západ = 90°, východ = -90°.

Fotovoltaická sestava

Fotovoltaické moduly jsou uspořádány do čtyř polí. Každé fotovoltaické pole je složeno ze 48 ks modulů, celkem je ve fotovoltaické fasádě instalováno 192 ks modulů. Fotovoltaické moduly jsou od českého výrobce firmy SOLARTEC s.r.o. Původně měla dodávka obsahovat pouze typy RADIX PE 72-97 Marina Blue, vzhledem k reklamaci při dodávce bylo 10 ks nahrazeno modernějším typem RADIX PE 72-106 Marina Blue. V obou případech se jedná o moduly s monokrystalickými křemíkovými články v počtu 72 ks na modul. Elektricky jsou moduly zapojeny do 6 sekcí po 32 ks modulů. Každá sekce sestává z 8 ks modulů zapojených v sérii, tj. 4 série zapojené paralelně.

Tab. 4.2 Přehled informací o fotovoltaické sestavě

Fotovoltaické moduly - výrobce	SOLARTEC s.r.o., ČR
Použitý typ / počet (ks)	RADIX PE 72-97 Marina Blue / 182 RADIX PE 72-106 Marina Blue / 10
Celková plocha sestavy	164,5 m ²
Činná plocha sestavy	145,2 m ²

Tab. 4.3 Přehled informací o fotovoltaických modulech a článcích

Parametr / typ modulu	RADIX PE 72-97	RADIX PE 72-106
Celková plocha modulu	0,857 m ²	0,857 m ²

Parametr / typ modulu	RADIX PE 72-97	RADIX PE 72-106
Činná plocha modulu (včetně kontaktů)	0,756 m ²	0,756 m ²
I _{SC} [A] (pro STP)	2,96	3,25
U _{OC} [V]	43,20	43,20
I _m [A]	2,79	3,05
U _m [V]	34,80	34,80
P _m [W]	97,00	106,00
Materiálová struktura fotovoltaických článků	monokrystalické křemíkové	monokrystalické křemíkové
Rozměrové parametry fotovoltaického článku	102,5 x 102,5 mm, tl. 250 – 300 μm	102,5 x 102,5 mm, tl. 250 – 300 μm
FF [%]	0,75	0,75
EFF [%]	12,80	14,00

Měniče napětí

Přeměna stejnosměrného napětí fotovoltaické sestavy na střídavé napětí rozvodné sítě je v instalaci fotovoltaické fasády řešena použitím 6 ks měničů napětí, tj. pro každou sekci se 32 ks modulů je použit jeden měnič napětí. Měniče napětí jsou od firmy SUN PROFI, typ SP 2500-450.



Obr. 4.2 Pohled na 3 měniče napětí SUN PROFI

Tab. 4.4 Základní informace o použitých měničích napětí

Měniče napětí - výrobce	SUN PROFI
Použitý typ / počet (ks)	SP 2500-450 / 6
Doporučený vstupní výkon	3600 W _e
Maximální výstupní výkon	2500 W _e
Maximální účinnost	94 %
Evropská účinnost	92 %
Účinník (cos φ)	1,00

Kromě základních informací je třeba uvést, že použité měniče napětí pracují s kapacitou, tj. jsou v činnosti jen při dostatečném výkonu solární sestavy, kdy jsou automaticky zapínány a vypínány, což snižuje rovněž ztráty vlastní spotřebou na minimum. Použité měniče napětí pracují s průběhem výstupního proudu v sinusovém tvaru s odchylkou 3 %.

Indikační a měřicí zařízení

Fotovoltaická fasáda je vybavena systémem, umožňujícím pořizování, sběr a zálohování dat. Měřicí systém je schopen měřit intenzitu slunečního záření, a to v horizontální rovině i v rovině fotovoltaické fasády, teplotu fotovoltaických modulů, teplotu vlastního měřicího čidla a teplotu venkovního vzduchu. Dále jsou měřeny fyzikální veličiny, stejnosměrné napětí a proud, z nichž je průběžně počítán okamžitý stejnosměrný výkon. Doba měřicího cyklu závisí na rychlosti, kterou je stolní počítač schopen obsluhovat jednotlivé porty. Standardní rychlost je řádově desítky až stovky milisekund. Naměřené hodnoty jsou převáděny z analogových na digitální, a ukládány v měřicí ústředně UDAS (Multifunction USB Data Acquisition System), odkud jsou v desetiminutových intervalech exportovány do počítače. V počítači je instalován program s názvem PE Monitoring Data, který digitální informace z UDAS transformuje do vlastního souborového formátu. Výstupní formát souboru je textový a obsahuje data vždy pouze za jeden měřený den. Program počítá okamžitý stejnosměrný výkon a zaznamenává okamžitý střídavý výkon. Zdrojem dat okamžitého střídavého výkonu je jednofázový elektroměr. Program tento výkon automaticky násobí počtem střídačů, tj. číslem 6. Pro získávání průběžných, ale i celkových informací o vyrobené elektrické energii je

system fotovoltaické fasády vybaven elektronickým elektroměrem. Z důvodu výkupu vyrobené elektrické energie je do rozvodny instalován ještě mechanický elektroměr, který má statut schváleného měřidla.



Obr. 4.3 Pohled na rozvodnici s elektroměry

4.2 ZÁKLADNÍ UKAZATELE FVF

Technická data použitého zařízení fotovoltaického systému patří mezi velmi zajímavé informace pro hodnocení mezi konkurenčními výrobky při jejich výběru. Při reálném provozu se však může ukázat, že vzájemná kombinace použitých zařízení není zcela optimální. Může se rovněž ukázat, že i vlastnosti jednotlivých použitých zařízení nesplňují “papírové” předpoklady, což se většinou projeví zhoršenými vlastnostmi celého systému. Je tedy velmi vhodné, jsou-li k dispozici údaje z provozu obdobného systému, které můžeme nazvat základními ukazateli systému. V případě fotovoltaické fasády se tedy jedná o základní ukazatele fotovoltaické fasády. Ze základních ukazatelů fotovoltaické fasády, stanovených na základě experimentálního měření, lze usoudit, dosahuje-li použité zařízení v běžném provozu předpokládaných parametrů a je-li tedy vhodné pro dané použití.

Základními ukazateli fotovoltaické fasády jsou zejména:

- účinnost fotovoltaické fasády,
- účinnost použitých měničů napětí,
- účinnost konverze energie slunečního záření na fotovoltaické sestavě,
- závislost výkonu fotovoltaických modulů na jejich teplotě.

5 DALŠÍ FOTOVOLTAICKÉ INSTALACE

Evropský projekt PV Enlargement zahrnuje kromě instalace fotovoltaické fasády na TU v Liberci ještě další čtyři fotovoltaické instalace. Jak již bylo uvedeno, jedná se o instalace na technických univerzitách a na vysokých školách v České republice, jmenovitě: VŠB - Technická univerzita Ostrava, MFF Univerzity Karlovy v Praze, VUT v Brně a ZČU v Plzni.

5.1 FVS NA VŠB - TU V OSTRAVĚ

Fotovoltaická instalace představuje systém grid-on. Vyrobená elektrická energie je určena pro dodávku do vnitřní rozvodné sítě. Fotovoltaický systém je instalován na střeše budovy nové knihovny. Základní údaje o instalaci jsou uvedeny v (tab. 5.1).



Obr. 5.1 Pohled na fotovoltaickou instalaci

Tab. 5.1 Základní údaje o fotovoltaické instalaci

Místo instalace	VŠB – TU v Ostravě, střecha budovy nové knihovny
Zeměpisná poloha instalace	49°50' s.š, 18°09' v.d.
Azimut	≈ -20°
Sklon instalace (horizontální = 0°)	45°
Instalovaný špičkový elektrický výkon	20,2 kW _P
Maximální provozní elektrický výkon	17,7 kW _e

Pozn.: Azimut je uveden ve smyslu: jih = 0°, západ = 90°, východ = -90°.

Fotovoltaická sestava

Fotovoltaické moduly jsou seskupeny do dvou na sebe navazujících polí, uložených nad sebou. Každé fotovoltaické pole je složeno z 96 ks modulů, celkem je ve fotovoltaické sestavě instalováno 192 ks modulů. Fotovoltaické moduly jsou od českého výrobce firmy SOLARTEC s.r.o. Jedná se o moduly s monokrystalickými křemíkovými články v počtu 72 ks na modul. Elektricky jsou moduly zapojeny do 18 sekcí. První dvě sekce jsou se 30 moduly, druhé dvě sekce jsou se 33 moduly, třetí dvě sekce s 18 moduly, čtvrté dvě sekce jsou s 10 moduly a posledních 10 sekcí je po jednom modulu.

Tab. 5.2 Přehled informací o fotovoltaické sestavě

Fotovoltaické moduly - výrobce	SOLARTEC s.r.o., ČR
Použitý typ / počet (ks)	RADIX PE 72-106 / 192
Celková plocha sestavy	164,5 m ²
Činná plocha sestavy	145,2 m ²

Měniče napětí

Přeměna stejnosměrného napětí fotovoltaické sestavy na střídavé napětí rozvodné sítě je ve fotovoltaické instalaci řešena použitím 18 ks měničů napětí, tj. pro každou sekci je použit jeden měnič napětí. Měniče napětí jsou od firmy SOLARTEC s.r.o., typ OK4-100 a od firmy SMA Regelsysteme GmbH, typ Sunny Boy.

Tab. 5.3 Základní informace o použitých měničích napětí

Měniče napětí - výrobce	SOLARTEC s.r.o.	SMA Regelsysteme GmbH		
Použitý typ	OK4-100	SB SWR 3000	SB SWR 2000	SB SWR 850
Počet (ks)	10	4	2	2
Maximální výstupní výkon	100 W _e	3000 W _e	2000 W _e	850 W _e
Maximální účinnost	94,0 %	95,0 %	96,0 %	93,0
Evropská účinnost	-	-	-	91,3

Indikační a měřicí zařízení

Fotovoltaická instalace je vybavena systémem, umožňujícím pořizování, sběr a zálohování dat. Měřicí systém je schopen měřit intenzitu slunečního záření, a to v horizontální rovině i v rovině fotovoltaické sestavy, teplotu fotovoltaických modulů, teplotu venkovního vzduchu, směr a rychlost větru. Dále jsou na jednotlivých měničích napětí měřeny fyzikální veličiny, z nichž je průběžně počítán okamžitý stejnosměrný výkon fotovoltaické sestavy, registrován je počet hodin provozu měničů a celková dodaná elektrická energie každým měničem napětí. Data jsou shromažďována a zpracovávána v počítači, vybaveném odpovídajícím programem. Výstupní formát souboru je databázový typu Access. Program počítá okamžitý výkon a celkovou i denní elektrickou energii, dodanou fotovoltaickým systémem do sítě.

5.2 FVS NA MFF UNIVERZITY KARLOVY V PRAZE

Fotovoltaická instalace představuje systém grid-on. Vyrobená elektrická energie je dodávána do vnitřní rozvodné sítě v budově. Fotovoltaický systém je instalován na střeše budovy C, areálu Trója MFF UK v Praze. Základní údaje o instalaci jsou uvedeny v (tab. 5.4).



Obr. 5.2 Pohled na fotovoltaickou instalaci

Tab. 5.4 Základní údaje o fotovoltaické instalaci

Místo instalace	MFF UK v Praze, areál Trója, budova C
Zeměpisná poloha instalace	50°17' s.š., 14°27' v.d.
Azimut	≈ 15°
Sklon instalace (horizontální = 0°)	45°
Instalovaný špičkový elektrický výkon	20,35 kW _P
Maximální provozní elektrický výkon	18,90 kW _e

Pozn.: Azimut je uveden ve smyslu: jih = 0°, západ = 90°, východ = -90°.

Fotovoltaická sestava

Fotovoltaické moduly jsou seskupeny do jednoho fotovoltaického pole, složeného z 32 ks modulů v 6 řadách nad sebou. Celkem je ve fotovoltaické sestavě instalováno 192 ks modulů. Fotovoltaické moduly jsou od českého výrobce firmy SOLARTEC s.r.o. Jedná se o moduly s monokrystalickými křemíkovými články v počtu 72 ks na modul. Elektricky jsou moduly zapojeny do 20 sekcí. První čtyři sekce jsou se 30 moduly, další čtyři sekce jsou se 20 a 10 moduly a posledních 12 sekcí je po jednom modulu. Dva moduly z posledních 12 sekcí jsou upevněny na pohyblivém trackeru.

Tab. 5.5 Přehled informací o fotovoltaické sestavě

Fotovoltaické moduly - výrobce	SOLARTEC s.r.o., ČR
Použitý typ / počet (ks)	RADIX PE 72-106 / 192
Celková plocha sestavy	164,5 m ²
Činná plocha sestavy	145,2 m ²

Měniče napětí

Přeměna stejnosměrného napětí fotovoltaické sestavy na střídavé napětí rozvodné sítě je ve fotovoltaické instalaci řešena použitím 20 ks měničů napětí, tj. pro každou sekci je použit jeden měnič napětí. Měniče napětí jsou od firmy SOLARTEC s.r.o., typ OK4E-100 a od firmy SMA Regelsysteme GmbH, typ Sunny Boy.

Tab. 5.6 Základní informace o použitých měničích napětí

Měniče napětí - výrobce	SOLARTEC s.r.o.	SMA Regelsysteme GmbH		
Použitý typ	OK4E-100	SB SWR 3000	SB SWR 2000	SB SWR 850
Počet (ks)	12	4	2	2
Maximální výstupní výkon	100 W _e	3000 W _e	2000 W _e	850 W _e
Maximální účinnost	94,0 %	95,0 %	96,0 %	93,0
Evropská účinnost	-	-	-	91,3

Indikační a měřicí zařízení

Fotovoltaická instalace je vybavena systémem, umožňujícím pořizování, sběr a zálohování dat. Měřicí systém je schopen měřit intenzitu slunečního záření, a to v rovině fotovoltaické sestavy i v rovině modulů umístěných na trackeru, teplotu fotovoltaických modulů a teplotu venkovního vzduchu. Dále jsou na jednotlivých měničích napětí měřeny fyzikální veličiny, z nichž je průběžně počítán okamžitý stejnosměrný výkon fotovoltaické sestavy a celková dodaná elektrická energie každým měničem napětí. Data jsou shromažďována a zpracovávána v počítači, vybaveném odpovídajícím programem. Program počítá okamžitý výkon a celkovou i denní elektrickou energii, dodanou fotovoltaickým systémem do sítě.

5.3 FVS NA VUT V BRNĚ

Fotovoltaická instalace představuje systém grid-on. Vyrobená elektrická energie je určena pro dodávku do vnitřní rozvodné sítě. Fotovoltaický systém je instalován na střeše budovy C3, další zařízení je v budově B3. Základní údaje o instalaci jsou uvedeny v (tab. 5.7).



Obr. 5.3 Pohled na fotovoltaickou instalaci

Tab. 5.7 Základní údaje o fotovoltaické instalaci

Místo instalace	VUT v Brně, střecha budovy C3
Zeměpisná poloha instalace	49°12' s.š., 16°36' v.d.
Azimut	≈ -17°
Sklon instalace (horizontální = 0°)	45°
Instalovaný špičkový elektrický výkon	20,35 kW _p
Maximální provozní elektrický výkon	20,00 kW _e

Pozn.: Azimut je uveden ve smyslu: jih = 0°, západ = 90°, východ = -90°.

Fotovoltaická sestava

Fotovoltaické moduly jsou uspořádány do čtyř polí. Každé fotovoltaické pole je složeno ze 48 ks modulů, celkem je ve fotovoltaické sestavě instalováno 192 ks modulů. Fotovoltaické moduly jsou od českého výrobce firmy SOLARTEC s.r.o. Jedná se o moduly typu RADIX PE 72-106 s monokrystalickými křemíkovými články v počtu 72 ks na modul. Elektricky jsou moduly zapojeny do 8 sekcí po 24 ks modulů. Každá sekce sestává z 8 ks modulů zapojených v sérii, tj. 3 série zapojené paralelně.

Tab. 5.8 Přehled informací o fotovoltaické sestavě

Fotovoltaické moduly - výrobce	SOLARTEC s.r.o., ČR
Použitý typ / počet (ks)	RADIX PE 72-106 / 192
Celková plocha sestavy	164,5 m ²
Činná plocha sestavy	145,2 m ²

Měniče napětí

Přeměna stejnosměrného napětí fotovoltaické sestavy na střídavé napětí rozvodné sítě je ve fotovoltaické instalaci řešena použitím 8 ks měničů napětí, tj. pro každou sekci je použit jeden měnič napětí. Měniče napětí jsou od firmy SUN PROFI, typ SP 2500-450.

Tab. 5.9 Základní informace o použitých měničích napětí

Měniče napětí - výrobce	SUN PROFI
Použitý typ	SP 2500-450
Počet (ks)	8
Maximální výstupní výkon	2500 W _e
Maximální účinnost	94 %
Evropská účinnost	92 %

Indikační a měřicí zařízení

Fotovoltaická instalace je vybavena systémem, umožňujícím pořizování, sběr a zálohování dat. Měřicí systém je schopen měřit intenzitu slunečního záření, a to v horizontální rovině i v rovině fotovoltaické sestavy, teplotu fotovoltaických modulů,

teplotu vlastního měřicího čidla a teplotu venkovního vzduchu. Dále jsou měřeny fyzikální veličiny, stejnosměrné napětí a proud, z nichž je průběžně počítán okamžitý stejnosměrný výkon. Naměřené hodnoty jsou převáděny a ukládány v měřicí ústředně UDAS (Multifunction USB Data Acquisition System), odkud jsou exportovány do počítače. V počítači je instalován program s názvem PE Monitoring Data, který digitální informace z UDAS transformuje do vlastního souborového formátu. Výstupní formát souboru je textový a obsahuje data vždy pouze za jeden měřený den. Program počítá okamžitý stejnosměrný výkon a zaznamenává okamžitý střídavý výkon. Pro získávání průběžných, ale i celkových informací o vyrobené elektrické energii je fotovoltaický systém vybaven elektronickým elektroměrem.

5.4 FVS NA ZČU V PLZNI

Fotovoltaická instalace představuje systém grid-on. Vyrobená elektrická energie je určena pro dodávku do vnitřní rozvodné sítě. Fotovoltaický systém je instalován na střeše nové budovy elektrotechnické fakulty. Základní údaje o instalaci jsou uvedeny v (tab. 5.10).



Obr. 5.4 Pohled na fotovoltaickou instalaci

Tab. 5.10 Základní údaje o fotovoltaické instalaci

Místo instalace	ZČU v Plzni, nová budova FEL
Zeměpisná poloha instalace	49°43' s.š., 13°20' v.d.
Azimut	≈ 3°
Sklon instalace (horizontální = 0°)	45°
Instalovaný špičkový elektrický výkon	20,35 kW _p
Maximální provozní elektrický výkon	20,00 kW _e

Pozn.: Azimut je uveden ve smyslu: jih = 0°, západ = 90°, východ = -90°.

Fotovoltaická sestava

Fotovoltaické moduly jsou uspořádány do dvou polí. První fotovoltaické pole je složeno ze 180 ks modulů (30 ks v 6 řadách), druhé fotovoltaické pole je složeno z 12 ks modulů. Celkem je ve fotovoltaické sestavě instalováno 192 ks modulů. Fotovoltaické moduly jsou od českého výrobce firmy SOLARTEC s.r.o. Jedná se o moduly typu RADIX PE 72-106 s monokrystalickými křemíkovými články v počtu 72 ks na modul. Elektricky jsou moduly zapojeny do 8 sekcí po 24 ks modulů. Každá sekce sestává z 8 ks modulů zapojených v sérii, tj. 3 série zapojené paralelně.

Tab. 5.11 Přehled informací o fotovoltaické sestavě

Fotovoltaické moduly - výrobce	SOLARTEC s.r.o., ČR
Použitý typ / počet (ks)	RADIX PE 72-106 / 192
Celková plocha sestavy	164,5 m ²
Činná plocha sestavy	145,2 m ²

Měniče napětí

Přeměna stejnosměrného napětí fotovoltaické sestavy na střídavé napětí rozvodné sítě je ve fotovoltaické instalaci řešena použitím 8 ks měničů napětí, tj. pro každou sekci je použit jeden měnič napětí. Měniče napětí jsou od firmy SUN PROFI, typ SP 2500-450.

Tab. 5.12 Základní informace o použitých měničích napětí

Měniče napětí - výrobce	SUN PROFI
Použitý typ	SP 2500-450
Počet (ks)	8
Maximální výstupní výkon	2500 W _e
Maximální účinnost	94 %
Evropská účinnost	92 %

Indikační a měřicí zařízení

Fotovoltaická instalace je vybavena systémem, umožňujícím pořizování, sběr a zálohování dat. Měřicí systém je schopen měřit intenzitu slunečního záření, a to v horizontální rovině i v rovině fotovoltaické sestavy, teplotu fotovoltaických modulů, teplotu vlastního měřicího čidla a teplotu venkovního vzduchu. Dále jsou měřeny fyzikální veličiny, stejnosměrné napětí a proud, z nichž je průběžně počítán okamžitý stejnosměrný výkon. Naměřené hodnoty jsou převáděny a ukládány v měřicí ústředně UDAS (Multifunction USB Data Acquisition System), odkud jsou exportovány do počítače. V počítači je instalován program s názvem PE Monitoring Data, který digitální informace z UDAS transformuje do vlastního souborového formátu. Výstupní formát souboru je textový a obsahuje data vždy pouze za jeden měřený den. Program počítá okamžitý stejnosměrný výkon a zaznamenává okamžitý střídavý výkon. Pro získávání průběžných, ale i celkových informací o vyrobené elektrické energii je fotovoltaický systém vybaven elektronickým elektroměrem.

6 ČÁST TEORETICKÁ

Fundamentálním prvkem diplomové práce je, přes značnou šířku možností teoretického popisu probírané problematiky, stanovení základních ukazatelů fotovoltaické fasády. Prakticky se však tento proces, kterým stanovení základních a kvantitativních ukazatelů je, neobejde bez množství relevantních dat.

6.1 FOTOVOLTAICKÁ FASÁDA

6.1.1 Metodika stanovení základních ukazatelů

Jedním z hlavních cílů diplomové práce je stanovení účinnosti fotovoltaické fasády. Zde je potřeba uvést, že tento cíl je poněkud obšírný, a lze jej dosáhnout několika způsoby. Jedna z možností je stanovit špičkovou účinnost konverze energie v několika libovolných slunečných dnech. Vlastnosti každého fotovoltaického článku lze pro danou hodnotu intenzity slunečního záření a teplotu fotovoltaického článku popsat jednoznačnou závislostí, tj. V-A charakteristikou. V takovém případě je účinnost konverze energie významně ovlivněna polohou pracovního bodu, tedy zejména charakterem spotřebiče elektrické energie a schopnostmi střídačů. V případě fotovoltaické fasády je spotřebičem elektrické energie veřejná rozvodná síť. S ohledem na praktické využití energie slunečního záření, a to nejen v případě předmětné fotovoltaické fasády, má značný význam stanovení účinnosti konverze energie také při jiných než slunečných dnech. Dochází-li v průběhu roku ke značným a zejména častým změnám klimatických podmínek, a tomu tak skutečně v podmínkách České republiky je, je pro uživatele pravděpodobně nejzajímavějším údajem dlouhodobá účinnost konverze energie. K tomu je ovšem potřeba disponovat vhodnými daty.

Bohužel, nestabilita a značná nedokonalost prvních několika verzí programového vybavení (program PE Monitoring Data) je odpovědná za to, že nejsou k dispozici kontinuální data, potřebná pro stanovení dlouhodobější účinnosti fotovoltaické fasády. Důsledkem toho je nutnost upravit vyhodnocovaný časový úsek a pokusit se stanovit účinnost konverze energie v tomto kratším časovém úseku.

6.1.2 Účinnost fotovoltaické fasády

Účinnost fotovoltaické fasády lze pro i -tý časový úsek, přičemž za i -tý časový úsek lze považovat i měřené období, vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$\eta_{Ci} = \frac{E_{VYRi}}{E_{DOPi}} = \frac{E_{VYR}(\tau_i) - E_{VYR}(\tau_{i-1})}{A \cdot \int_{i-1}^i I \cdot d\tau}, \quad (6.1)$$

kde: E_{VYR} – elektrická energie vyrobená fotovoltaickou fasádou,
 E_{DOP} – energie slunečního záření dopadajícího na plochu fotovoltaické sestavy,
 I – intenzita slunečního záření, A – plocha fotovoltaické sestavy.

6.1.3 Účinnost konverze energie slunečního záření

Účinnost konverze energie slunečního záření na fotovoltaické sestavě lze pro i -tý časový úsek, přičemž za i -tý časový úsek lze považovat i měřené období, vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$\eta_i = \frac{E_{GENi}}{E_{DOPi}} = \frac{\int_{i-1}^i P_{GEN} \cdot d\tau}{A \cdot \int_{i-1}^i I \cdot d\tau}, \quad (6.2)$$

kde: P_{GEN} – elektrický výkon generovaný fotovoltaickou sestavou,
 E_{GEN} – elektrická energie vyrobená fotovoltaickou sestavou,
 E_{DOP} – energie slunečního záření dopadajícího na plochu fotovoltaické sestavy,
 I – intenzita slunečního záření, A – plocha fotovoltaické sestavy.

6.1.4 Účinnost použitých měničů napětí

Účinnost použitých měničů napětí lze pro i -tý časový úsek, přičemž za i -tý časový úsek lze považovat i měřené období, vypočítat s použitím následujícího vztahu v integrálním tvaru

$$\eta_{Si} = \frac{E_{GEN}}{E_{IO}} = \frac{\int_{i-1}^i P_{GEN} \cdot d\tau}{\int_{i-1}^i P_{IO} \cdot d\tau}, \quad (6.3)$$

kde: P_{GEN} – elektrický výkon generovaný fotovoltaickou sestavou,
 P_{IO} – elektrický výkon na výstupu z měniče napětí,
 E_{GEN} – elektrická energie vyrobená fotovoltaickou sestavou,
 E_{IO} – elektrická energie transformovaná měničem napětí.

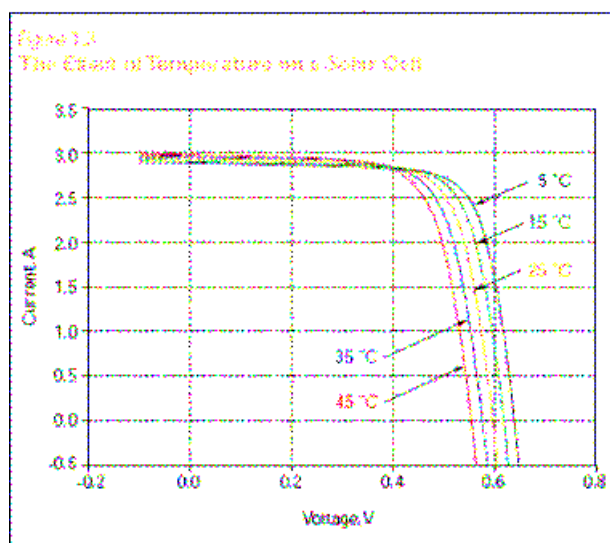
Pozn.: Diferenciální tvar rovnice není pro výpočet účinnosti použitých měničů napětí vhodný. Na kapacitě měničů dochází při nižším zatížení měničů ke kumulaci nábojů a tím k časovému posunu vybíjení oproti nabíjení měničů.

6.1.5 Závislost výkonu fotovoltaických modulů na jejich teplotě

Generovaný stejnosměrný výkon je určen pracovním bodem jednotlivých článků, tj. napětím a proudem. Teoretické napětí modulů je dáno jejich interním zapojením, závisí na spektru dopadajícího slunečního záření a s rostoucí teplotou klesá. Teoretický generovaný proud je rovněž dán interním zapojením modulů, jeho velikost je úměrná intenzitě dopadajícího slunečního záření a s rostoucí teplotou roste. Početně lze teplotní vliv vyjádřit teplotním koeficientem, který charakterizuje závislost parametrů na teplotě.

Tab. 6.1 Typické hodnoty závislosti parametrů na teplotě pro monokrystalický křemík

Parametr	U_{OC}	I_{SC}	U_m	I_m	P_m
Teplotní koeficient [%/°C]	-0,34	0,09	-0,45	0,00	-0,45



Obr. 6.1 Závislost V-A charakteristiky na teplotě

6.2 POROVNÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH INSTALACÍ

Dalším z hlavních cílů diplomové práce je porovnání instalace fotovoltaické fasády na TU v Liberci s ostatními čtyřmi fotovoltaickými instalacemi v rámci evropského projektu PV Enlargement. Má-li však dojít k relevantnímu srovnání jednotlivých instalací, je nutné, aby data ze všech instalací byla pořízena pokud možno ve stejném časovém období, resp. za stejné časové úseky. Z pořízených dat je možné stanovit kvantitativní ukazatele jednotlivých instalací. Protože kvantitativní ukazatele vypovídají pouze o množství vyrobené elektrické energie v určitém časovém úseku a nezohledňují použitý systém a zeměpisnou polohu instalace, je vhodné z těchto ukazatelů následně stanovit ukazatele kvalitativní.

Kvantitativními ukazateli jsou zejména:

- celková roční vyrobená elektrická energie,
- vyrobená elektrická energie v jednotlivých měsících za měřené období,
- vyrobená elektrická energie v referenčním měsíci,
- vyrobená elektrická energie v jednotlivých dnech v referenčním měsíci,
- přehled dopadajícího slunečního záření v horizontální rovině v referenčním měsíci,
- přehled dopadajícího slunečního záření v rovině sestavy v referenčním měsíci.

Kvalitativními ukazateli jsou zejména:

- výkonový poměr,
- výtěžnost fotovoltaického systému,
- střední výkon fotovoltaického systému,
- přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy a doby slunečního svitu,
- přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy, doby slunečního svitu a použité techniky.

6.2.1 Metodika stanovení kvantitativních ukazatelů

Celková roční vyrobená elektrická energie

Celkovou roční vyrobenou elektrickou energii lze vypočítat jako vyrobenou elektrickou energii za měřené časové období s použitím následujícího vztahu

$$E_{RVYRj} = E_{VYRj}(\tau_2) - E_{VYRj}(\tau_1), \quad (6.4)$$

kde: E_{RVYRj} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI.

Vyrozená elektrická energie v jednotlivých měsících za měřené období

Vyrozenou elektrickou energii v jednotlivých měsících lze vypočítat jako vyrobenou elektrickou energii v měřeném časovém úseku s použitím následujícího vztahu

$$E_{MVYRij} = E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1}), \quad (6.5)$$

kde: E_{MVYRij} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý měsíc.

Vyrozená elektrická energie v jednotlivých dnech v referenčním měsíci

Vyrozenou elektrickou energii v jednotlivých dnech v referenčním měsíci lze vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$E_{DVYRij} = E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1}), \quad (6.6)$$

kde: E_{DVYRij} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý den.

6.2.2 Metodika stanovení kvalitativních ukazatelů

Výkonový poměr

Jedním z hodnotících kritérií fotovoltaických systémů je výkonový poměr, jenž lze vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$R_{pj} = \frac{E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1})}{E_{TEORj}}, \quad (6.7)$$

kde: E_{VYRj} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý časový úsek,
 E_{TEORj} – teoreticky vyrobiteľná elektrická energie j-tou FVI za i-tý časový úsek.

Výtěžnost fotovoltaického systému

Výtěžnost fotovoltaického systému jako další hodnotící kritérium lze vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$Y_{PVSj} = \frac{E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1})}{P_{mj}}, \quad (6.8)$$

kde: E_{VYRj} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý časový úsek,
 P_{mj} – maximální výkon FVI.

Střední výkon fotovoltaického systému

Střední výkon fotovoltaického systému je další hodnotící kritérium. Toto kritérium má vazbu na dobu slunečního svitu, tj. klimatické podmínky konkrétní fotovoltaické instalace. Lze jej vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$P_{Sj} = \frac{E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1})}{\tau_{(i,i-1)j}}, \quad (6.9)$$

kde: E_{VYRj} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý časový úsek,
 $\tau_{(i,i-1)j}$ – počet hodin slunečního svitu pro j-tou FVI za i-tý časový úsek.

Přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy a doby slunečního svitu

Tato přepočtená vyrobená energie je hodnotící kritérium, které umožňuje srovnání fotovoltaických instalací nezávisle na jejich zeměpisné poloze, prostorové orientaci a klimatických podmínkách. Lze jej vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$E_{P2F} = \frac{E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1})}{\varepsilon_P \cdot \varepsilon_\tau}, \quad (6.10)$$

kde: E_{VYRj} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý časový úsek,
 ε_P – faktor zahrnující vliv zeměpisné polohy a prostorové orientace FVI,
 ε_τ – faktor zahrnující vliv klimatických podmínek.

Přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy, doby slunečního svitu a použité techniky

Tato přepočtená vyrobená energie je hodnotící kritérium, které umožňuje srovnání fotovoltaických instalací nezávisle na jejich zeměpisné poloze, prostorové orientaci, klimatických podmínkách a použitím technickém zařízení. Lze jej vypočítat s použitím následujícího vztahu

$$E_{P3F} = \frac{E_{VYRj}(\tau_i) - E_{VYRj}(\tau_{i-1})}{\varepsilon_P \cdot \varepsilon_\tau \cdot \varepsilon_T}, \quad (6.11)$$

kde: E_{VYRj} – elektrická energie vyrobená j-tou FVI za i-tý časový úsek,
 ε_P – faktor zahrnující vliv zeměpisné polohy a prostorové orientace FVI,
 ε_τ – faktor zahrnující vliv klimatických podmínek,
 ε_T – faktor zahrnující vliv použitého technického zařízení FVI.

7 ČÁST EXPERIMENTÁLNÍ

7.1 ÚDAJE O MĚŘENÍ A MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJÍCH

7.1.1 Měřicí systém fotovoltaické fasády

Fotovoltaická fasáda je již od své instalace vybavena systémem, umožňujícím pořizování, sběr a zálohování dat. Měřicí systém byl popsán již dříve, proto zde budou uvedeny pouze dříve nespecifikované podrobnosti. Jedná se především o přehled použitých měřících přístrojů, jimiž je indikační a měřicí systém fotovoltaické fasády vybaven.

Tab. 7.1 Použité měřicí přístroje

Označení přístroje		Použití
A1a	Senzor SRM 9-4, 0 až 1300 Wm^{-2} , kalibrováno	Měření intenzity slunečního svitu v rovině fotovoltaické fasády
A1b	Snímač Pt 100, součást senzoru A1a	Měření teploty senzoru A1a
A3	Snímač Pt 100	Měření teploty modulů
A6	Snímač Pt 100	Měření teploty venkovního vzduchu
A2	Pyranometr, ventilační jednotka	Měření intenzity slunečního svitu v horizontální rovině
A4	Ampérmetr	Měření proudu před střídačem
A5	Voltmetr	Měření napětí před střídačem
D1	Elektroměr, 230V, 1000 imp/kWh	Měření okamžitého výkonu pro informační panel
D3	Elektroměr EIZ-EDWC 7390, 3x230/400 V, 10000 imp/kWh, M-Bus	Měření vyrobené elektrické energie fotovoltaickou fasádou
Měřicí ústředna UDAS 1001E, komunikace s PC přes USB		Sběr, zpracování a převod signálů (A/D), uchování dat
Stolní PC sestava, OS Windows XP, program PE Monitoring Data		Import dat, převod do souborového formátu

Přesnost měřicího systému nebylo možné laboratorně ověřit. Důvodem je absence srovnatelných, kalibrovaných kontrolních přístrojů a obtížně proveditelné měření. Program PE Monitoring Data je poměrně citlivý na jakékoliv zásahy a v případě jeho výpadku jsou nová data zaznamenávána nejdříve od následujícího dne. Bylo proto provedeno kontrolní měření intenzity slunečního záření a kontrola vyrobené elektrické energie odečtem na fakturačním třífázovém elektroměru, který není datově s indikačním a měřicím systémem fotovoltaické fasády propojen.

7.1.2 Kontrolní měření

Cíl kontrolního měření

Hlavním cílem kontrolního měření bylo ověření správnosti měření indikačního a měřicího systému fotovoltaické fasády.

1) Ověření měření intenzity dopadajícího sl. záření na rovinu fotovoltaické fasády

Od doby uvedení měřicího systému do provozu byly zaznamenávány nesmyslné naměřené hodnoty intenzity dopadajícího slunečního záření na rovinu fotovoltaické fasády. Po instalaci nového senzoru SRM 9-4 byly již naměřené a zaznamenané údaje v relaci k naměřeným a zaznamenaným hodnotám intenzity dopadajícího slunečního záření na horizontální rovinu.

2) Stanovení výpočetního algoritmu pro přepočet záznamů o vyr. elektrické energii

Protože stále nebyl znám výpočetní algoritmus, kterým byl prováděn přepočet záznamu z elektroměru EIZ-EDWC 7390, bylo rovněž provedeno kontrolní měření v měsíci listopadu 2005 s odečtem vyrobené elektrické energie na fakturačním elektroměru.

Měřicí přístroje a zařízení

Na štítovou stěnu budovy F pod senzor SRM 9-4 byl instalován kontrolní pyranometr RS 81-I a snímač teploty. Pyranometr byl nastaven do polohy, ve které byl schopen měřit intenzitu slunečního záření v rovině fotovoltaické fasády. Základním požadavkem na jeho instalaci bylo umístění co nejbližší senzoru A1a, jehož naměřené hodnoty měl kontrolovat. Snímač teploty byl umístěn na dřevěný nosič s plechovou stříškou a

vysunut asi 1 m před štítovou stěnu budovy F, aby nebyl ovlivňován prouděním vzduchu při povrchu budovy. Pro sběr analogových signálů byla zvolena měřicí ústředna ALMENO 2290-8. Vyrobená elektrická energie byla odečítána na fakturačním třífázovém elektroměru ETS 429 S1L.

Tab. 7.2 Použité měřicí přístroje

Označení přístroje	Použití
Pyranometr RS 81-I, 0 až 1200 Wm^{-2} , 0,3 až 3 μm , 4 až 20 mA	Měření intenzity slunečního svitu v rovině fotovoltaické fasády
Termočlánek NiCr-Ni, -200 až +1370 °C	Měření teploty venkovního vzduchu
Měřicí ústředna ALMEMO 2290-8, 5 vstupů (7 až 9 V, max 100 mA), 2 výstupy	Sběr, zpracování a převod signálů (A/D), uchování dat
Zdroj napětí, 230/9 V, vyrobeno na TUL	Napájení pyranometru RS 81-I
Elektroměr ETS 429 S1L, 3x230/400 V, 500 imp/kWh, fakturační elektroměr	Fakturační měření vyrobené elektrické energie
Přenosný počítač-notebook, OS Windows XP, program Almemo a MS Excel	Import dat, možný převod do formátu *.xls

Přesnost kontrolního pyranometru RS 81-I nebyla laboratorně ověřována, pyranometr by však měl být od výrobce kalibrován. Měřicí rozsah pyranometru RS 81-I je 0 až 1200 Wm^{-2} , což odpovídá výstupnímu proudu 4 až 20 mA. Je proto nutné provést posun pracovní nuly na hodnotu 4 mA při lineární závislosti výstupního proudu na intenzitě dopadajícího slunečního záření. Pro výpočet měřené hodnoty intenzity dopadajícího slunečního záření je použit vztah

$$I_m = k \cdot (x + q), \quad (7.1)$$

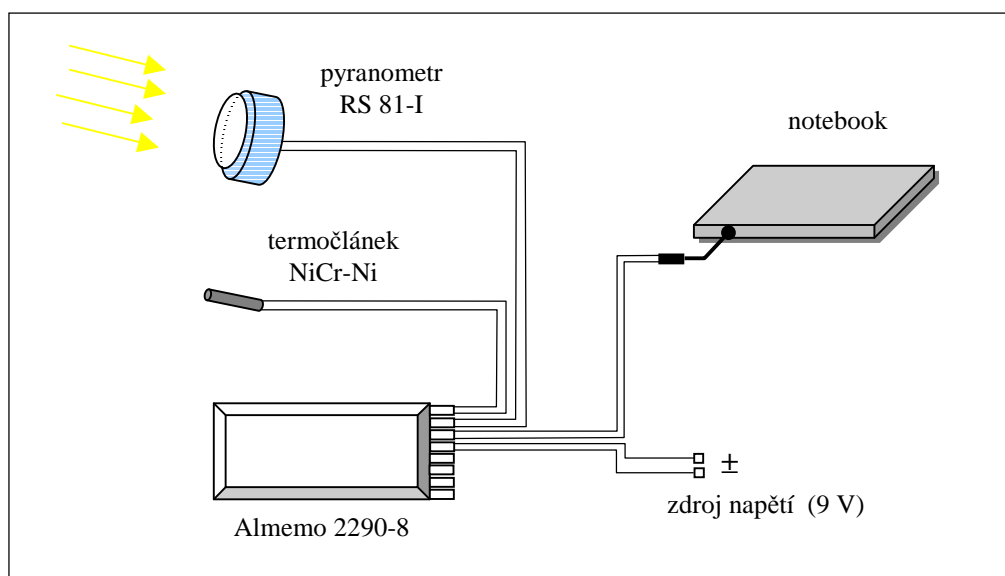
kde: I_m – měřená hodnota intenzity dopadajícího slunečního záření,
 k – směrnice kontrolního pyranometru,
 I – hodnota výstupního proudu z kontrolního pyranometru,
 q – posun pracovní nuly.

Směrnice kontrolního pyranometru je

$$k = \frac{(I_{m \max} - I_{m \min})}{(I_{\min} - I_{\max})} = \frac{(1200 - 0)}{(20 - 4)} = 75(-), \quad (7.2)$$

posun pracovní nuly je

$$q = 0 - I_{\min} = -4mA. \quad (7.3)$$



Obr. 7.1 Schéma kontrolního měření

Ověření měření intenzity dopadajícího sl. záření na rovinu fotovoltaické fasády

Kontrolní měření bylo prováděno souběžně s hlavním měřením na fotovoltaické fasádě, při kterém byla zpracována data z indikačního a měřicího systému fotovoltaické fasády. K ověření správnosti měření indikačního a měřicího systému fotovoltaické fasády byla vybrána data pořízená z intenzivního měření ve třech měřicích dnech v měsících říjen a listopad 2005. První kontrolní měření proběhlo 10. října 2005, druhé 8. listopadu 2005 a poslední 23. listopadu 2005. Hodnoty byly odečítány ve 30minutových nebo hodinových intervalech, přičemž doba měření byla přizpůsobena zkracující se délce dnů. Jednotlivá měření byla provedena za rozdílných slunečných podmínek. První měření bylo provedeno za jasného dne s mírnou inverzní oblačností, druhé za polojasného dne a poslední za zcela oblačného dne.

Dne 4.10.2005 bylo provedeno zkušební měření. V jeho průběhu došlo k několika výpadkům komunikace mezi PC a měřicí ústřednou a bylo nutné několikrát přestavět parametry měřicí ústředny. Výsledky proto nejsou prezentovány.

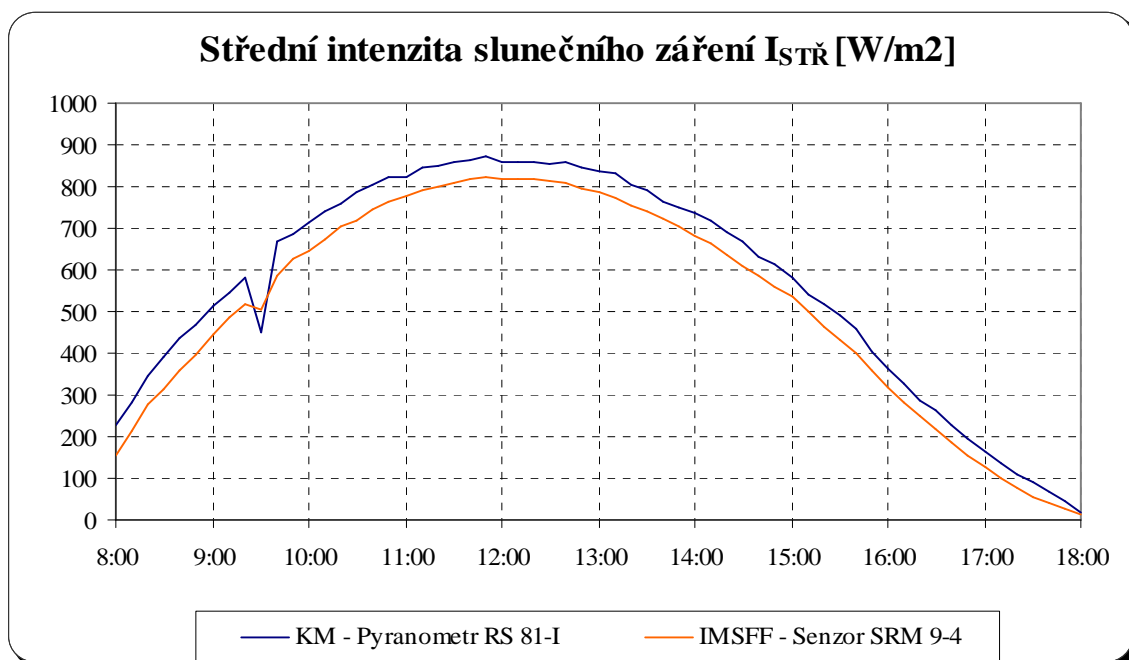
Tab. 7.3 Naměřená data

Měřené hodnoty / datum měření		10.10.2005	08.11.2005	23.11.2005
		8 ⁰⁰ – 18 ⁰⁰	8 ⁰⁰ – 17 ⁰⁰	8 ⁰⁰ – 16 ⁰⁰
Střední měřená intenzita dopad. sl. záření I_{STR} [Wm ⁻²]	KM	575,8	119,1	50,8
	IMSFF	523,6	113,7	34,5
	Δ	52,2	5,4	16,3
	odchylka [%]	9,1	4,5	32,1
Střední měřená teplota venkovního vzduchu t (°C)	KM	16,3	8,0	0,2
	IMSFF	15,9	8,9	1,6
	Δ	0,4	-0,9	-1,4
	odchylka [%]	2,5	-11,3	-700,0
Suma energie měřeného dopad. sl. záření E_{DOP} [kWh]	KM	836,3	155,7	59,0
	IMSFF	760,5	148,6	40,1
	Δ	75,8	7,1	18,9
	odchylka [%]	9,1	4,6	32,0

Pozn.: KM – naměřené hodnoty při kontrolním měření, IMSFF – naměřené hodnoty získané z indikačního a měřicího systému fotovoltaické fasády.

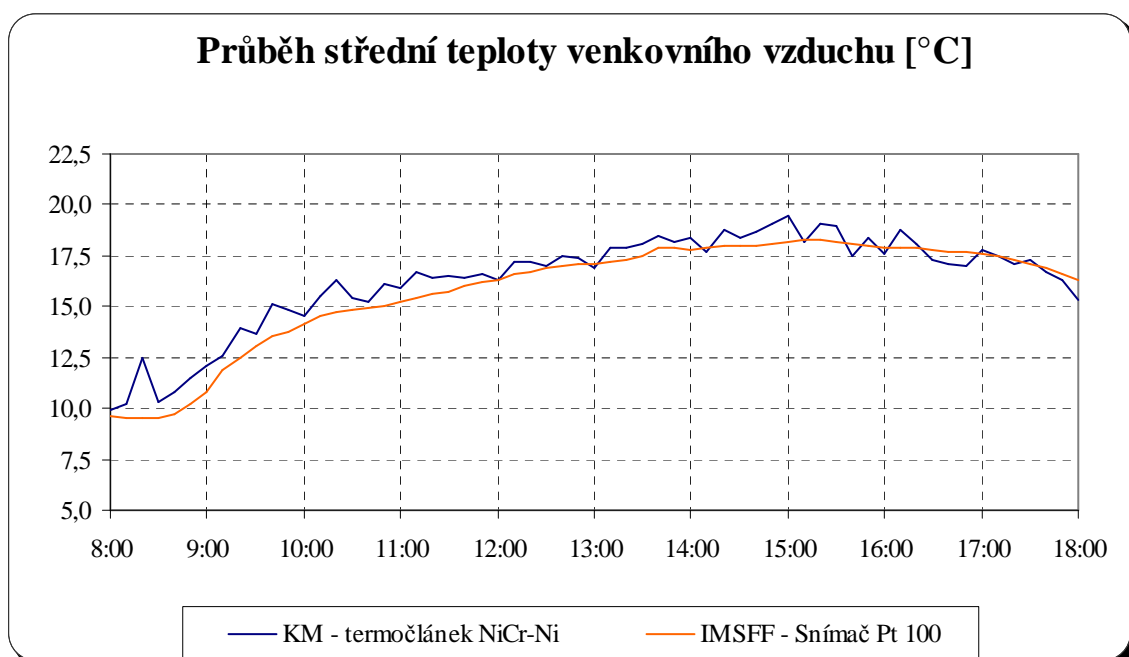
Naměřené odchylky střední intenzity dopadajícího slunečního záření jsou pravděpodobně systematického charakteru a jsou způsobené měřicími metodami. Zatímco kontrolní pyranometr RS 81-I je založen na principu měření teplotního rozdílu osluněných bílých a černých polí, přičemž skleněná kopule umožňuje měření slunečního záření i při velkých úhlech, je senzor SRM 9-4 založen na principu fotovoltaického jevu a má shodné vlastnosti s fotovoltaickými moduly. Vzhledem k povaze měření lze považovat naměřené odchylky za **vyhovující**.

Graf 7.1 Srovnání naměřených hodnot střední intenzity slunečního záření z 10.10.2005



Naměřené odchylky střední teploty venkovního vzduchu jsou způsobeny rozdílným umístěním teplotních snímačů. Vliv oslunění je zde malý, rozhodující vliv tak má proudění vzduchu v okolí budovy. Zvláště při nižších teplotách se výrazně projevil vliv teplotního pole v blízkosti střechy budovy. Naměřené odchylky jsou **vyhovující**.

Graf 7.2 Srovnání naměřených hodnot střední teploty venkovního vzduchu z 10.10.2005



Stanovení algoritmu pro přepočítání záznamů o vyrobené elektrické energii

Přestože indikační a měřicí systém fotovoltaické fasády získává data o vyrobené elektrické energii z elektronického elektroměru EIZ-EDWC 7390, záznamy programu PE Monitoring Data s údaji na elektroměru nekorespondují a nelze s nimi přímo pracovat. Dodavatel systému, firma SOLARTEC s.r.o., poskytla důležité informace, pomocí kterých je možné záznamy o vyrobené elektrické energii rozklíčovat. Použitý elektroměr EIZ-EDWC 7390 je vybaven vnitřním registrem, který vždy při hodnotě 1966,08 přeteče. Měřicí systém však přetečení neviduje, navíc kvůli častým výpadkům měření nejsou záznamy úplné a je tudíž velmi obtížné počet přetečení zjistit. Pro stanovení výpočetního algoritmu pro přepočítání záznamů o vyrobené elektrické energii bylo provedeno kontrolní měření v měsíci listopadu 2005 s odečtem vyrobené elektrické energie na fakturačním elektroměru.

Základní přepočítání lze provést s využitím vztahu

$$E_{EL} = (N_O \cdot 1966,08) + E_{ZAZ}, \quad (7.4)$$

kde: E_{EL} – základní přepočtená hodnota vyrobené elektrické energie,

N_O – počet přetečení vnitřní paměti elektroměru,

E_{ZAZ} – záznam hodnoty vyrobené elektrické energie.

Protože takto přepočtená hodnota stále ještě neodpovídá skutečně vyrobené elektrické energii, bylo nutné nalézt další vhodnou úpravu. Při zjišťování vztahu mezi přepočtenými hodnotami vyrobené elektrické energie a hodnotami naměřenými fakturačním elektroměrem se vycházelo z údajů uvedených v (tab. 7.4).

Tab. 7.4 Naměřená přepočtená data

Měřené hodnoty / datum měření	10.10.2005	08.11.2005	23.11.2005
KM - elektroměr ETS 429 S1L [kWh]	70,1	14,9	2,6
IMSFF- elektroměr EIZ-EDWC 7390 [kWh]	705,0	150,0	27,0

Pozn.: KM – naměřené hodnoty při kontrolním měření, IMSFF – naměřené hodnoty získané z indikačního a měřicího systému fotovoltaické fasády.

Z porovnání naměřených hodnot je zřejmé, že hodnoty vypočtené podle vztahu (7.4) jsou přibližně desetinásobkem hodnot naměřených fakturačním elektroměrem. Byl tedy zvolen přepočtový faktor 10 a s tímto faktorem byly přepočteny záznamy za celé měřené období, tedy od 17.11.2004 do 1.2.2005. Ukázalo se však, že takto nelze přepočítat hodnoty v celém měřeném období. Od počátku měřeného období až do 30.5.2005 jsou zaznamenávány hodnoty s přepočtovým faktorem 1 a od 30.5.2005 až do konce měřeného období je přepočtový faktor 10. Hodnoty lze tedy přepočítat do použitelné podoby dle následujícího vztahu

$$E_{VYR} = \frac{E_{EL}}{f}, \quad (7.5)$$

kde: E_{EL} – základní přepočtená hodnota vyrobené elektrické energie,
 f – přepočtový faktor; do 30.5.2005 $f = 1$; od 30.5.2005 $f = 10$,
 E_{VYR} – vypočtená hodnota vyrobené elektrické energie.

Tab. 7.5 Hodnoty vypočtené vyrobené elektrické energie

Měřené hodnoty / datum měření	10.10.2005	08.11.2005	23.11.2005
KM - elektroměr ETS 429 S1L [kWh]	70,1	14,9	2,6
IMSFF- elektroměr EIZ-EDWC 7390 [kWh]	70,5	15,0	2,7
Δ [kWh]	-0,4	-0,2	-0,1
Odchylka [%]	-0,6	-1,0	-3,8

Pozn.: KM – naměřené hodnoty při kontrolním měření, IMSFF – naměřené hodnoty získané z indikačního a měřícího systému fotovoltaické fasády.

Výsledné hodnoty vypočtené vyrobené elektrické energie fotovoltaickou fasádou vykazují jen malou odchylku, což je s ohledem na třídu přesnosti použitých elektroměrů **vyhovující**.

7.2 MĚŘENÍ NA FOTOVOLTAICKÉ FASÁDĚ

7.2.1 Stanovení základních ukazatelů fotovoltaické fasády

Stanovení účinností na fotovoltaické fasádě bylo provedeno s využitím dat naměřených a zaznamenaných indikačním a měřicím systémem fotovoltaické fasády. Bylo využito třech měřicích dnů, kdy souběžně probíhalo kontrolní měření. Jedná se o 10. října 2005, 8. listopadu 2005 a 23. listopadu 2005. Z dat naměřených během těchto měřicích dnů bylo možné velmi dobře vyhodnotit většinu základních ukazatelů fotovoltaické fasády. Důležitým faktorem jsou zde rozdílné sluneční a teplotní podmínky v měřicích dnech.

Stanovení účinnosti fotovoltaické fasády η_C

Účinnost fotovoltaické fasády byla stanovena s využitím vztahu (6.1). Jako i -tý časový úsek byl využit desetiminutový interval, ve kterém měřicí systém fotovoltaické fasády naměřená data zaznamenává. Problémem takto stanovené účinnosti je časový posun při vybíjení kapacity měničů napětí oproti energii dopadající na plochu fotovoltaické sestavy při nízkých intenzitách dopadajícího slunečního záření. Dochází tak k výraznějším výchylkám vypočtené účinnosti, a to oběma směry. Z tohoto důvodu je významově důležitější celková denní účinnost fotovoltaické fasády, kdy je za i -tý časový úsek považován měřicí den.

Stanovení účinnosti konverze energie slunečního záření η

Účinnost konverze energie slunečního záření na fotovoltaické sestavě byla stanovena s využitím vztahu (6.2). Jako i -tý časový úsek byl využit desetiminutový interval. Rovněž byla stanovena celková denní účinnost konverze energie, kde za i -tý časový úsek je považován měřicí den.

Účinnost požitých měničů napětí η_S

Účinnost použitých měničů napětí byla stanovena s využitím vztahu (6.3). Jako i -tý časový úsek byl využit desetiminutový interval. Tak jako v případě účinnosti fotovoltaické fasády i zde nastává problém s časovým posunem při vybíjení kapacity měničů. Proto i zde je významově důležitější celková denní účinnost požitých měničů, kdy za i -tý časový úsek je považován měřicí den.

Tab. 7.6 Naměřené hodnoty a vypočtené účinnosti na fotovoltaické fasádě

Měřené hodnoty / datum měření	10.10.2005	08.11.2005	23.11.2005
Vypočtená vyrobená el. energie E_{VYR} [kWh]	70,5	15,0	2,7
Energie dopadajícího sl. záření E_{DOP} [kWh]	760,5	148,6	40,1
Energie vyrobená fotovoltaickou sestavou E_{GEN} [kWh]	82,3	17,8	3,7
Energie transformovaná měniči E_{IO} [kWh]	75,4	15,8	2,7
Účinnost fotovoltaické fasády η_C [%]	9,3	10,1	6,7
Účinnost konverze energie sl. záření η [%]	10,8	12,0	9,2
Účinnost použitých měničů napětí η_S [%]	91,6	88,7	71,8

Uvedené výsledky vypočtených účinností musí splňovat podmínku celkové účinnosti, kterou lze pro případ fotovoltaické fasády zapsat rovnicí

$$\eta_C = \eta \cdot \eta_S \cdot \eta_V, \quad (7.6)$$

kde: η_C – účinnost fotovoltaické fasády,
 η – účinnost konverze energie sl. záření,
 η_S – účinnost použitých měničů napětí,
 η_V – účinnost vedení a spojovacích prvků.

Tab. 7.7 Hodnoty účinnosti fotovoltaické fasády vypočtené s využitím vztahu (7.6)

Vypočtené hodnoty / datum měření	10.10.2005	08.11.2005	23.11.2005
Účinnost konverze energie sl. záření η [%]	10,8	12,0	9,2
Účinnost použitých měničů napětí η_S [%]	91,6	88,7	71,8
Účinnost vedení a spojovacích prvků η_V [%]	99,0	99,0	99,0
Účinnost fotovoltaické fasády η_C [%]	9,8	10,5	6,5
Odchylka [%]	+5,4	+3,9	-3,0

Pozn.: Hodnota účinnosti vedení a spojovacích prvků byla převzata z tabulky (2.2).

Vypočtené hodnoty účinnosti fotovoltaické fasády se pohybují v rozmezí od +5,4 % do -3,0 %. Důvodem vzniklých odchylek je:

- skutečnost, že účinnost vedení a spojovacích prvků nebyla stanovena na základě měření na fotovoltaické fasádě a nezohledňuje tudíž rozdíly vzniklé při velkém a malém zatížení elektrických rozvodů fotovoltaické fasády,
- skutečnost, že hodnota účinnosti použitých měničů je počítána z měření na jednom měniči,
- přesnost měření.

Závislost výkonu fotovoltaických modulů na jejich teplotě

Stanovení závislosti výkonu fotovoltaických modulů na proměnných faktorech bylo provedeno s využitím dat naměřených a zaznamenaných indikačním a měřicím systémem fotovoltaické fasády v měřicím období od 17. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005. Protože se generovaný výkon fotovoltaické sestavy s intenzitou dopadajícího slunečního záření mění, byly sestaveny závislosti proudu a napětí na teplotě pro různé intenzity dopadajícího slunečního záření v rozsahu od 100 W/m² do 900 W/m². Rozsah teplot fotovoltaických modulů byl zvolen od -5 °C do 45°C.

Z bodových údajů napětí a proudu náležících dané intenzitě slunečního záření byly vypočteny rovnice regresních přímků závislosti napětí a proudu. Z rovnic regresních přímků byly stanoveny střední hodnoty pro nulovou teplotu a následně vypočteny hodnoty teplotních koeficientů dle vztahu

$$\alpha_{U,t} = k_U \cdot \frac{100}{U_m} = \frac{\Delta U_m}{\Delta t} \cdot \frac{100}{U_m}, \quad (7.7)$$

a dále dle vztahu

$$\alpha_{I,t} = k_I \cdot \frac{100}{I_m} = \frac{\Delta I_m}{\Delta t} \cdot \frac{100}{I_m}, \quad (7.8)$$

kde: $\alpha_{U,t}$ – teplotní koeficient pro napětí, $\alpha_{I,t}$ – teplotní koeficient pro proud,
 k_U – teplotní směrnice pro napětí, k_I – teplotní směrnice pro proud,
 U_m – napětí modulů, I_m – proud modulů,
 Δt – teplotní rozsah, ve kterém platí $\alpha_{U,t}$ a $\alpha_{I,t}$.

Teplotní koeficient pro výkon modulů fotovoltaické fasády byl vypočten s využitím vztahu (2.7), a to následovně:

$$\begin{aligned} P_{m0} &= U_{m0} \cdot I_{m0}, \\ P_{m1} &= U_{m1} \cdot I_{m1}, \\ P_{m1} &= U_{m0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta t \cdot \alpha_{U,t}}{100}\right) \cdot I_{m0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta t \cdot \alpha_{I,t}}{100}\right), \end{aligned} \quad (7.9)$$

po úpravě

$$\alpha_{P,t} = \frac{\Delta t}{100} \cdot (\alpha_{U,t} \cdot \alpha_{I,t}) + \alpha_{U,t} + \alpha_{I,t}, \quad (7.10)$$

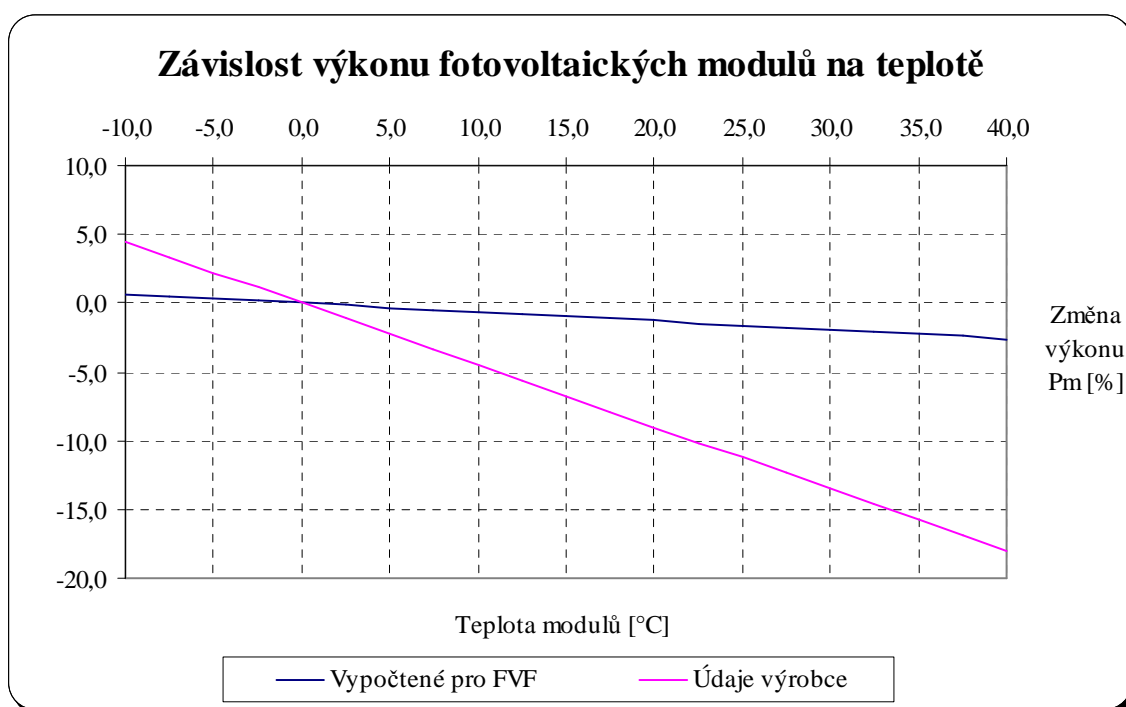
kde: $\alpha_{P,t}$ – teplotní koeficient pro výkon modulů,

P_m – výkon modulů.

Tab. 7.8 Vypočtené hodnoty závislostí parametrů na teplotě

Parametr	U_m	I_m	P_m
Teplotní koeficient α_t [%/°C]	-0,204	0,155	-0,065

Graf 7.3 Závislost výkonu modulů fotovoltaické fasády na jejich teplotě

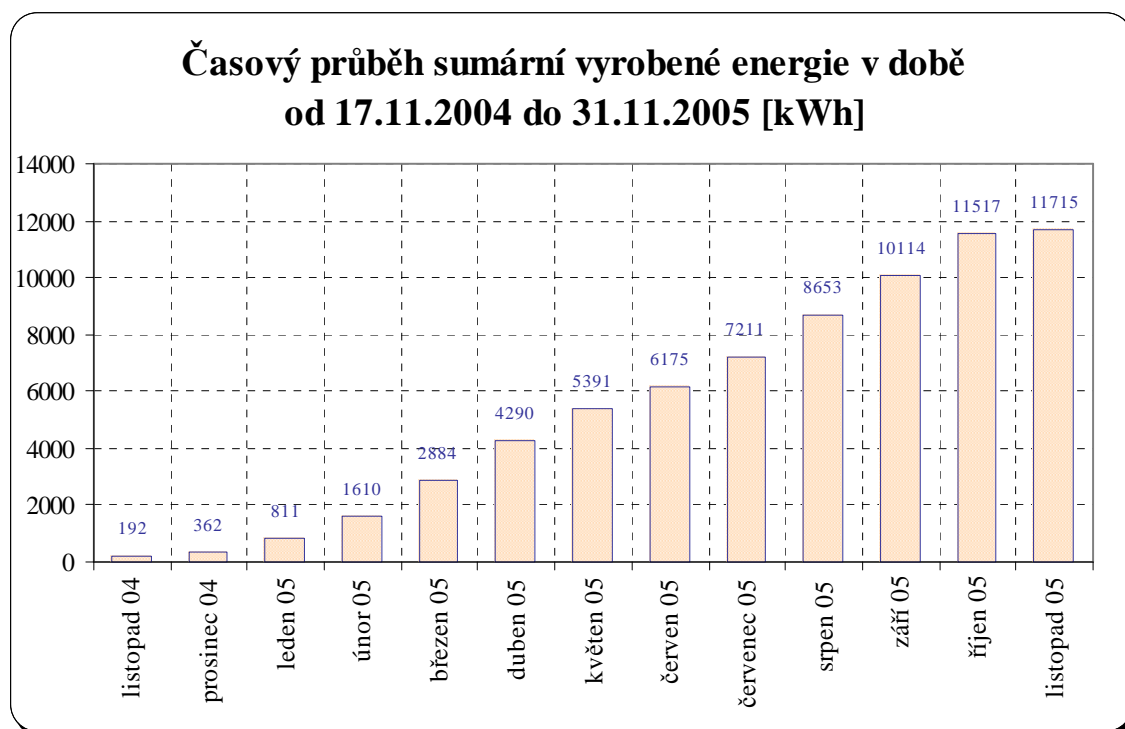


7.2.2 Přehled vyrobené elektrické energie fotovoltaickou fasádou

Celková vyrobená elektrická energie fotovoltaickou fasádou v měřicím období od 17. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005 byla stanovena s využitím vztahů (6.4), (7.4) a (7.5). Toto měřicí období bylo zvoleno ze dvou důvodů. Prvním důvodem byla snaha vyhodnotit roční výrobu elektrické energie fotovoltaickou fasádou. Druhým důvodem pak skutečnost, že k datu 17. listopadu 2004 byl znám odečet jak na fakturačním elektroměru, tak i na elektronickém elektroměru EIZ-EDWC 7390.

V měřicím období byla fotovoltaickou fasádou vyrobená elektrická energie **11 715 kWh**.

Graf 7.4 Časový průběh sumární vyrobené energie FVF v měřeném období



7.3 POROVNÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH INSTALACÍ

7.3.1 Kvantitativní ukazatele fotovoltaických instalací

Stanovení kvantitativních ukazatelů na fotovoltaických instalacích je provedeno v měřicím období od 11. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005. Vzhledem k počáteční nespolehlivosti indikačních a měřicích systémů jednotlivých instalací, ale i dalším neovlivnitelným faktorům, není měřicí období zahájeno ve všech případech ve stejný den. Odchyšky jsou však jen v řádu dní, a proto je možné tato data vyhodnotit a vzájemně porovnat.

Celková roční vyrobená elektrická energie E_{RVYR}

Celková roční vyrobená elektrická energie byla vypočtena s využitím vztahu (6.4). V případě fotovoltaických systémů na VUT v Brně a ZČU v Plzni bylo ještě využito vztahů (7.4) a (7.5). Měřicím obdobím v tomto případě nebyl přesně jeden rok, ale období od 11. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005.

Vyrozená elektrická energie v jednotlivých měsících za měřené období E_{MVYR}

Elektrická energie vyrobená v jednotlivých měsících v měřicím období byla vypočtena s využitím vztahu (6.5), přičemž i zde bylo nutné použít v případě fotovoltaických systémů na VUT v Brně a ZČU v Plzni vztahů (7.4) a (7.5). Měřicím obdobím je v tomto případě období od 11. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005.

Vyrozená elektrická energie v jednotlivých dnech v referenčním měsíci E_{DVYR}

Elektrická energie vyrobená v jednotlivých dnech v referenčním měsíci byla vypočtena s využitím vztahu (6.6), přičemž i zde bylo nutné použít v případě fotovoltaických systémů na VUT v Brně a ZČU v Plzni vztahů (7.4) a (7.5). Referenčním měsícem byl zvolen listopad 2005. Jedná se totiž o první celý měsíc, kdy byl v provozu kalibrovaný senzor SRM 9-4 v systémech na VUT v Brně, ZČU v Plzni i TUL v Liberci.

Tab. 7.9 Základní parametry fotovoltaických instalací

	TU v Liberci	VŠB-TU v Ostravě	MFF UK v Praze	VUT v Brně	ZČU v Plzni
Azimut	$\approx -14^\circ$	$\approx -20^\circ$	$\approx 15^\circ$	$\approx -17^\circ$	$\approx 3^\circ$
Sklon instalace	90°	45°	45°	45°	45°
Výkon instalace	18,71 kW _p	20,20 kW _p	20,35 kW _p	20,35 kW _p	20,35 kW _p
Disponibilní výkon	15,00 kW _e	17,70 kW _e	18,90 kW _e	20,00 kW _e	20,00 kW _e

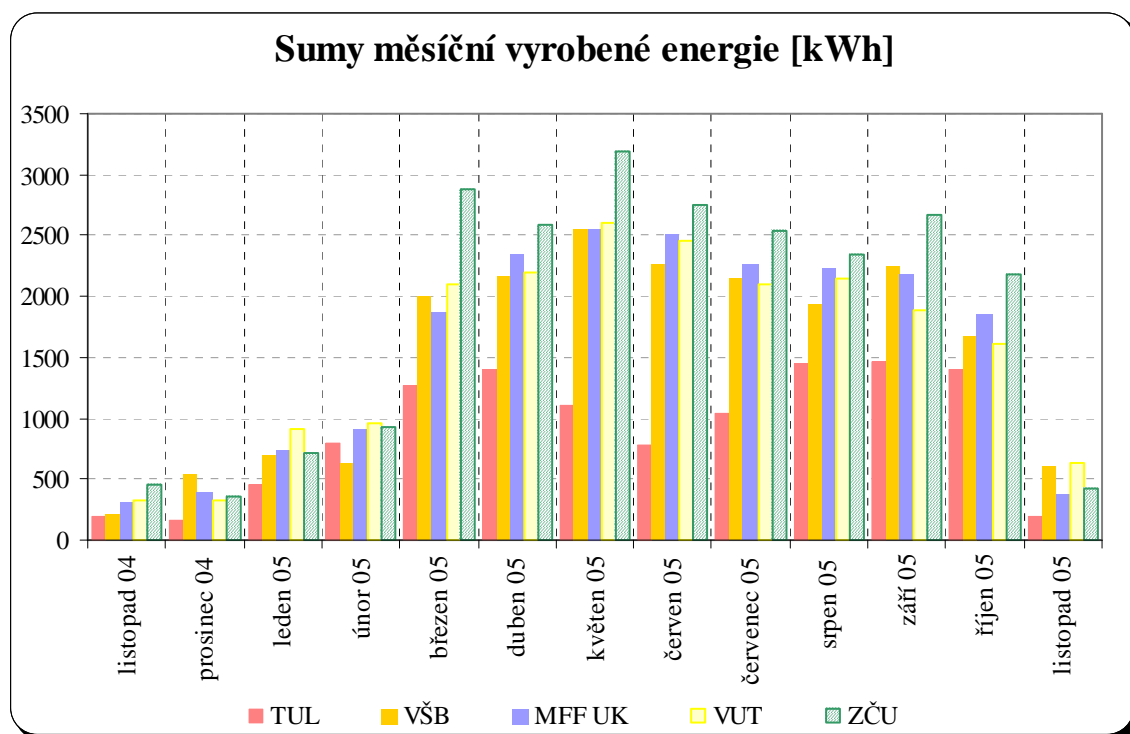
Pozn.: Azimut je uveden ve smyslu: jih = 0° , západ = 90° , východ = -90° .

Tab. 7.10 Vyrobená elektrická energie za měřicí období E_{RVYR} a E_{MVYR} [kWh]

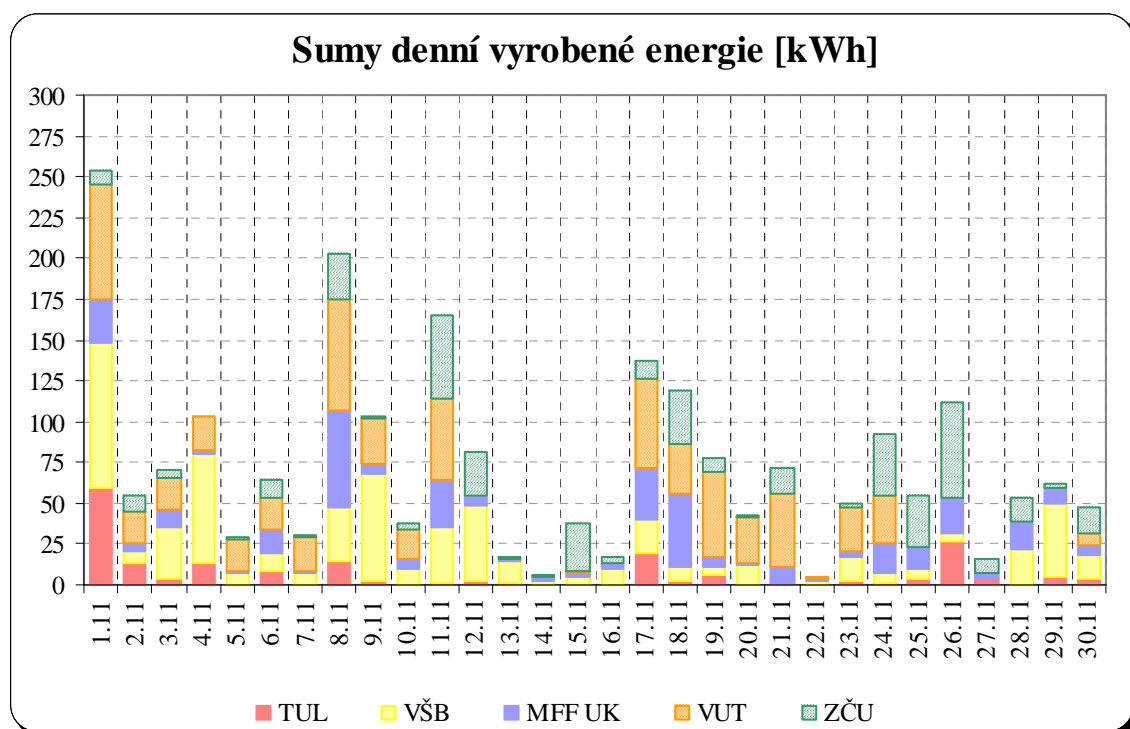
	TU v Liberci*	VŠB-TU v Ostravě*	MFF UK v Praze*	VUT v Brně*	ZČU v Plzni**
Listopad 04	192	206	303	320	455
Prosinec 04	170	534	385	318	352
Leden 05	449	702	726	914	715
Únor 05	799	628	919	963	923
Březen 05	1274	1998	1865	2101	2882
Duben 05	1406	2161	2338	2196	2581
Květen 05	1101	2549	2555	2600	3192
Červen 05	784	2256	2502	2465	2752
Červenec 05	1036	2148	2269	2105	2547
Srpen 05	1442	1933	2235	2142	2350
Září 05	1461	2240	2180	1890	2665
Říjen 05	1402	1675	1852	1609	2179
Listopad 05	198	595	369	628	425
Σ	11715	19625	20498	20250	24018

Pozn.: * 17.11.2004 – 31.11.2005, ** 19.11.2004 – 31.11.2005

Graf 7.5 Sumy měsíční vyrobené elektrické energie E_{MVYR} jednotlivými FVI



Graf 7.6 Sumy denní vyrobené elektrické energie E_{DVYR} jednotlivými FVI v měsíci listopadu 2005



7.3.2 Kvalitativní ukazatele fotovoltaických instalací

Stanovení kvalitativních ukazatelů na fotovoltaických instalacích bylo provedeno s využitím naměřených a zaznamenaných dat měřicími systémy jednotlivých instalací v měřicím období, tj. od 11. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005.

Výkonový poměr R_P

Výkonový poměr byl vypočten s využitím vztahu (6.7). Teoreticky vyrobitelná elektrická energie byla vyjádřena jako disponibilní výkon jednotlivých instalací po dobu trvání slunečního svitu v jednotlivých lokalitách v měřicím období.

Výtěžnost fotovoltaického systému Y_{PVS}

Výtěžnost fotovoltaického systému byla vypočtena s využitím vztahu (6.8).

Střední výkon fotovoltaického systému P_S

Střední výkon fotovoltaického systému byl vypočten s využitím vztahu (6.9). Údaje o počtu hodin slunečního svitu byly získány od Českého hydrometeorologického institutu ve formě měsíčních sum slunečního svitu pro lokality jednotlivých fotovoltaických instalací. Měřicí období bylo v tomto případě bylo od 1. prosince 2004 do 31. listopadu 2005.

Pozn.: Trvání slunečního svitu je měřeno slunoměry SD4, případně SD5, přičemž hraniční hodnota intenzity slunečního svitu je nastavena na 120 W/m^2 , což vylučuje dobu trvání pouze difúzního záření.

Tab. 7.11 Základní kvalitativní ukazatele fotovoltaických instalací

	TU v Liberci	VŠB-TU v Ostravě	MFF UK v Praze	VUT v Brně	ZČU v Plzni
Výkonový poměr R_P [-]	0,49	0,52	0,58	0,52	0,66
Výtěžnost Y_{PVS} [kWh/kW _p]	626,1	971,5	1007,3	995,1	1180,2
Střední výkon P_S [kW]	7,3	9,3	10,9	10,3	13,3

Přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy a doby slunečního svitu E_{P2F}

Přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy a doby slunečního svitu byla vypočtena s využitím vztahu (6.10). Teoreticky vyrobitelná elektrická energie byla vypočtena metodou profesora Cihelky, při níž bylo využito vztahů (2.1.), (2.2), (2.3) a (2.4). Dále bylo využito údajů o počtu hodin slunečního svitu získaných od Českého hydrometeorologického institutu. Údaje byly vztaženy k instalaci na ZČU v Plzni.

Přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy, doby slunečního svitu a použité techniky E_{P3F}

Přepočtená vyrobená energie se zahrnutím vlivu polohy, doby slunečního svitu a použité techniky byla vypočtena s využitím vztahu (6.11). Teoreticky vyrobitelná elektrická energie a počet hodin slunečního svitu byl stejný jako v případě předešlého ukazatele. Vliv použité techniky, tj. použitého systému jednotlivých fotovoltaických instalací, byl vyjádřen pomocí disponibilního výkonu jednotlivých instalací. Údaje byly vztaženy k instalaci na ZČU v Plzni.

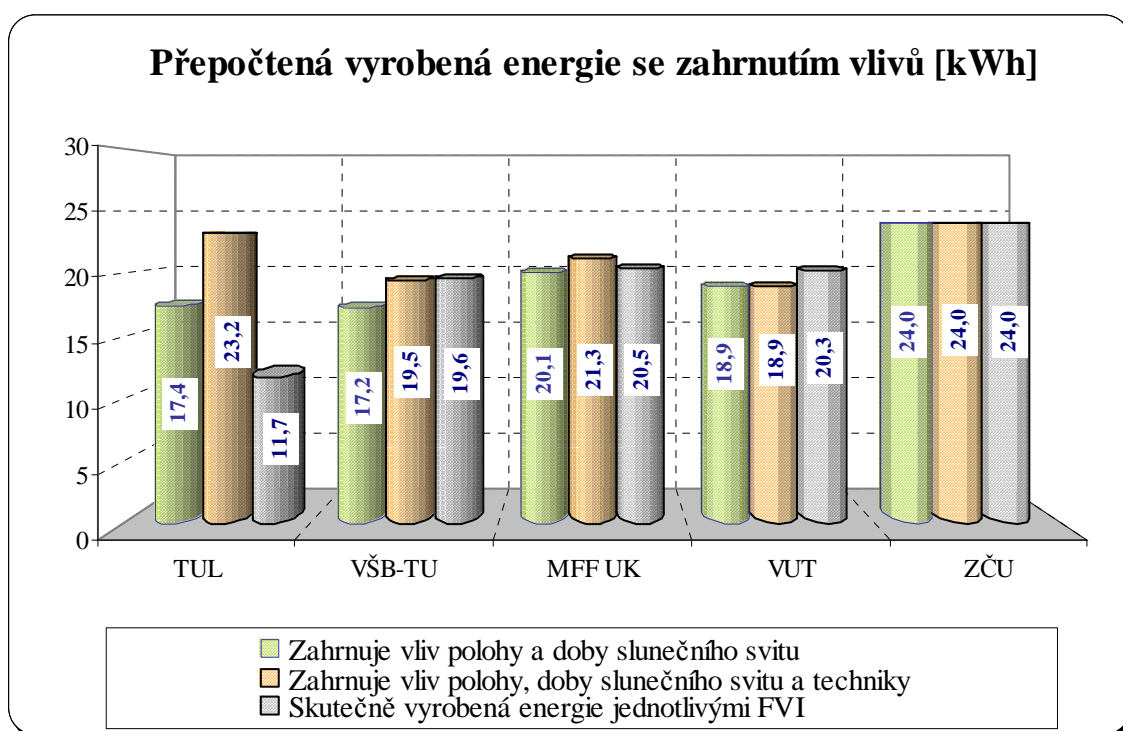
Tab. 7.12 Doplnkové kvalitativní ukazatele fotovoltaických instalací

	TU v Liberci	VŠB-TU v Ostravě	MFF UK v Praze	VUT v Brně	ZČU v Plzni
Vliv polohy instalace ε_P [-]	0,756	0,973	0,981	0,987	1,000
Vliv doby trvání sl. svitu ε_τ [-]	0,890	1,170	1,040	1,083	1,000
Vliv použité techniky ε_T [-]	0,750	0,885	0,945	1,000	1,000
Přepočtená energie E_{P2F} [MWh]	17,41	17,23	20,10	18,94	24,02
Přepočtená energie E_{P3F} [MWh]	23,21	19,46	21,27	18,94	24,02

7.3.3 Vyhodnocení ukazatelů fotovoltaických instalací

Již z prostorových orientací jednotlivých fotovoltaických instalací bylo možné předpokládat výrazný handicap fotovoltaické fasády na TU v Liberci. Tento předpoklad se také potvrdil, když nejen z kvantitativních ukazatelů vyplývá jednoznačně nejnižší výkonnost této instalace. Situace se však mění, je-li do srovnávání zahrnut alespoň vliv polohy a doby slunečního svitu nebo též vliv použité techniky.

Graf 7.7 Doplnkové kvalitativní ukazatele fotovoltaických instalací



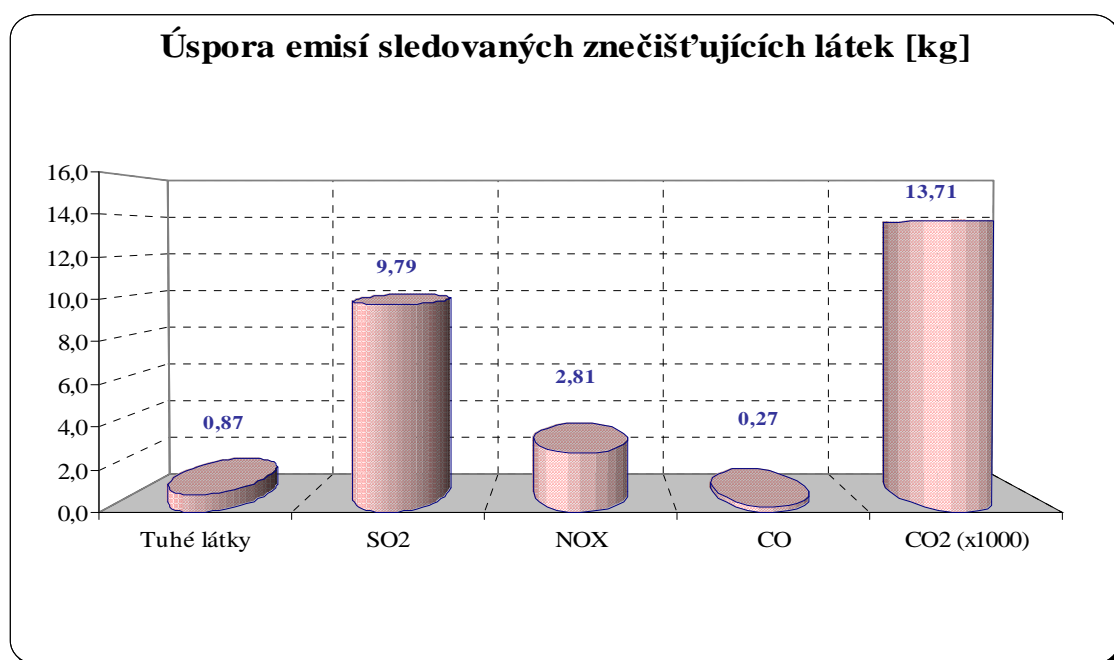
8 ENVIRONMENTÁLNÍ VYHODNOCENÍ FVF

Pro posouzení přínosu fotovoltaické fasády životnímu prostředí byl proveden výpočet množství sledovaných látek, emitovaných do ovzduší při získávání potřebného množství energie. Při jejich výpočtu se vycházelo z platných emisních faktorů stanovených nařízením vlády č. 352/2002 Sb. a z všeobecných emisních faktorů oxidu uhličitého CO₂ stanovených vyhláškou č. 425/2004 Sb. Vyhodnocovacím obdobím je měřicí období od 17. listopadu 2004 do 31. listopadu 2005.

Tab. 8.1 Environmentální přínos fotovoltaické fasády

Vyrobená elektrická energie FVF [MWh]	Emisní faktory znečišťujících látek				
	Tuhé látky [kg/MWh]	SO ₂ [kg/MWh]	NO _x [kg/MWh]	CO [kg/MWh]	CO ₂ [t/MWh]
	0,0744	0,8359	0,2399	0,0232	1,1700
	Emise znečišťujících látek				
	Tuhé látky [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]	CO [kg]	CO ₂ [t]
11,7	0,8716	9,7926	2,8104	0,2723	13,7066

Graf 8.1 Environmentální přínos fotovoltaické fasády



9 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ FVF

Ekonomické hodnocení je prováděno na bázi porovnání finančních efektů plynoucích z realizace hodnocené fotovoltaické fasády a finančních nároků s realizací spojených. Z hlediska nároků na finanční zdroje se jedná o investiční vysokonákladovou akci. Pro hodnocení ekonomické efektivity se používají zejména kritéria založená na diskontování.

Čistý tok hotovosti

Čistý tok hotovosti (cash flow) v daném období se stanovuje podle vztahu

$$CF = U - IN, \quad (9.1)$$

kde: CF – cash flow (tok hotovosti),
 U – změna provozních nákladů,
 IN – náklady kapitálového charakteru spojené s pořízením FVF.

Reálná doba návratnosti (T_d)

Reálná doba návratnosti investice se stanovuje z podmínky

$$\sum_{n=1}^{T_d} CF_n \cdot (1 + p)^{-n} - IN = 0, \quad (9.2)$$

kde: p – diskontní činitel,
 $(1 + p)^{-n}$ – odúročitel.

Tab. 9.1 Výchozí předpoklady pro provedení výpočtů

Název parametru	Měr. jednotka	Hodnota
Diskontní činitel p	-	1,08
Doba hodnocení T	roky	20
Cena nakupované elektrické energie v roce 2005	Kč.kWh ⁻¹	2,21
Výkupní cena elektrické energie (zelené bonusy)	Kč.kWh ⁻¹	5,67
Vyrobená elektrická energie E_{VYR}	kWh	11715
Investiční náklady na pořízení fotovoltaické fasády IN	tis. Kč	9 623,0

Tab. 9.2 Výsledky výpočtu ekonomické efektivity

Název parametru	Měr. jednotka	Hodnota
Přínos fotovoltaické instalace v roce 2005	tis.Kč	92,3
Doba návratnosti prostá	roky	104,2
Doba návratnosti reálná	roky	nesplatí se
Cena vyrobené elektrické energie odpisová	Kč.kWh ⁻¹	> 54,8
Cena vyrobené elektrické energie vztažená k době garance výkonu – 20 roků	Kč.kWh ⁻¹	> 41,1
Měrná cena fotovoltaické instalace	Kč.W _p ⁻¹	514,3

Pozn.: V ekonomických výpočtech není uvažováno s nutností obměny technických zařízení s nižší dobou životnosti než je doba ekonomického hodnocení, která byla zvolena s ohledem na dobu garance výkonu fotovoltaických modulů jejich výrobcem. Dále není ve výpočtech uvažováno s dotacemi a eskalací cen elektrické energie.

Z provedených výpočtů ekonomické efektivity vyplývá, že fotovoltaická fasáda na TU v Liberci není ekonomicky efektivní a tudíž ani komerčně zajímavou alternativou konvenčním zdrojům elektrické energie.

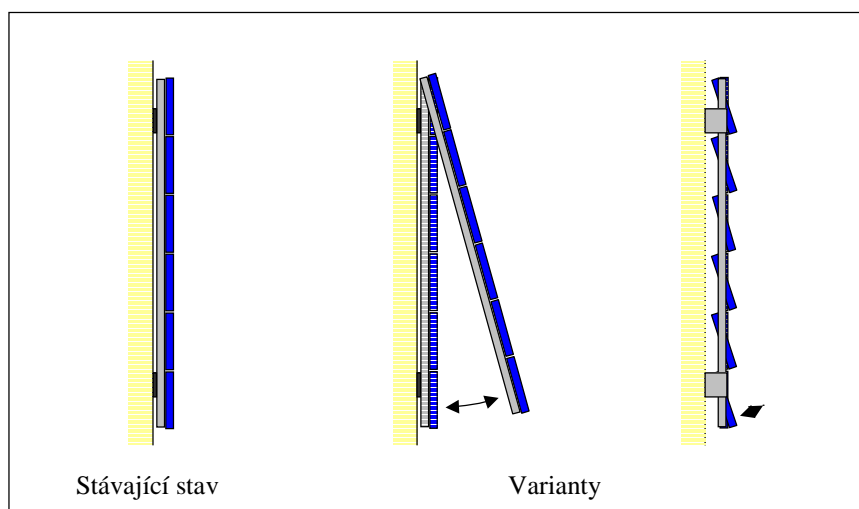
Tento závěr však neplatí obecně. Aby mohla být za stávajících legislativních (zákon č. 180/2005 Sb., Cenové rozhodnutí ERÚ č. 10/2005) a kritériálních (diskont 8 %, cenová eskalace 0 %) podmínek fotovoltaická instalace ekonomicky efektivní, o ekologické efektivity není pochyb, měly by být splněny alespoň následující podmínky:

- měrná cena fotovoltaické instalace < 115 Kč/W_p,
- garance výkonu fotovoltaických modulů > 20 let,
- výtěžnost fotovoltaické instalace > 1000 kWh/kW_p.

10 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE FVF

Na základě analýzy fotovoltaické fasády, která byla v diplomové práci provedena, bylo možné sestavit přehled nedostatků, které nepříznivě ovlivňují celkovou efektivnost výroby elektrické energie.

Z porovnání fotovoltaické fasády s ostatními instalacemi vyplynulo a výpočtem bylo ověřeno, že prvním závažným nedostatkem fotovoltaické fasády je její prostorová orientace, resp. sklon fotovoltaických modulů 90° . Za nejprůzračnější z celoročního hlediska lze považovat úhel 45° . Řešením by byla změna konstrukce zavěšení modulů, která by dovolila alespoň omezeně měnit jejich sklon. Fotovoltaická instalace by tak dokázala i nadále využívat svých předností v období zimního slunovratu, zároveň by však dokázala lépe využívat slunečního záření v době, kdy je Slunce výše nad obzorem. Další možností by bylo přemístění modulů na střechu budovy a jejich orientování na jih se sklonem 45° .



Obr. 10.1 Konstrukce FVF s možností změny sklonu modulů

Ze srovnání parametrů jednotlivých fotovoltaických instalací vyplynul také další významný nedostatek fotovoltaické fasády, kterým jsou použité fotovoltaické moduly. V porovnání s ostatními instalacemi jsou použity starší méně výkonné typy, což se projevuje nejnižším instalovaným výkonem při stejné ploše instalace, tj. nižší účinností. Řešením by byla náhrada 182 ks modulů typu RADIX PE 72-97 Marina Blue novějším typem a následně úprava elektrického zapojení modulů do 8 sekcí. Tento krok

by však byl z ekonomického hlediska pravděpodobně neefektivní.

Další z možností jak zvýšit výkonnost fotovoltaické fasády je vytřídit již použité fotovoltaické moduly tak, aby v jednotlivých elektrických sekcích byly zapojeny jen moduly se srovnatelnými parametry. Tento bod je však platný obecně.

K dalším možnostem optimalizace fotovoltaické fasády je možné přistupovat spíše jako k možným námětům, kterými lze zvýšit efektivnost výroby elektrické energie. Obecně však již nemají tak výrazný vliv na výkonnost instalací. Jedná se zejména o možnost kaskádního řazení měničů napětí dle jejich okamžitého vytížení nebo možnost natáčení fotovoltaických modulů za Sluncem.

11 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá jedním ze způsobů environmentálně šetrné výroby elektrické energie, a to přímou přeměnou energie slunečního záření, využívající fotovoltaického jevu. Prvním jejím cílem bylo experimentální stanovení účinnosti přeměny energie slunečního záření na fotovoltaické fasádě, vyhodnocení použitého fotovoltaického systému a navržení vhodných optimalizačních opatření.

Stanovení účinností na FVF bylo provedeno s využitím dat naměřených a zaznamenaných indikačním a měřicím systémem FVF. Měření bylo provedeno ve třech měřicích dnech s rozdílnými slunečními a teplotními podmínkami. Bylo zjištěno, že účinnost FVF dosahuje maximálních hodnot v průměru v měřicím dni jen mírně nad **10 %**. Dále bylo zjištěno, že účinnost konverze energie slunečního záření na fotovoltaických modulech dosahuje v průměru v měřicím dni účinnosti až **12 %**. Tato hodnota se blíží udávané energetické účinnosti použitých fotovoltaických článků, tj. 12,8 %, z nichž jsou sestaveny moduly RADIX PE 72-97, které jsou na fotovoltaické fasádě zastoupeny v 95 %. Rovněž bylo zjištěno, že použité měniče napětí pracují s vysokou účinností v průměru v měřicím dni až **91,6 %**, což je hodnota blízká se udávané evropské účinnosti použitých měničů napětí, tj. 92 %. Běžné provozní hodnoty účinnosti použitých měničů napětí jsou výrazně ovlivňovány klimatickými podmínkami.

FVF představuje instalaci systému připojeného na veřejnou rozvodnou síť, tedy tzv. grid-on systému. Hlavními prvky fotovoltaického systému jsou tak fotovoltaické moduly, měniče napětí a rozvodné zařízení. Nejvýznamnější z hlediska vlivu na efektivitu výroby elektrické energie jsou jen fotovoltaické moduly a měniče napětí. Bylo zjištěno, že použité fotovoltaické moduly nepatří dosahovanou účinností k nejmodernějším, což je patrné také ze srovnání jednotlivých fotovoltaických instalací. Rovněž bylo zjištěno, že použité měniče napětí patří svými výkonovými parametry k moderním a kvalitním výrobkům s vysokou účinností. Jejich elektrické zapojení však snižuje celkový výstupní elektrický výkon FVF, což může vést k jejich přetěžování. Při přetěžování měniče napětí pracují s nižší účinností, než je jejich maximální. Tato skutečnost je do jisté míry kompenzována vyšší účinností měničů napětí při nižších výkonech, a to nejen posuvem 10% výkonové hranice k nižším proudovým hodnotám,

ale též svým kapacitním charakterem. Právě kapacitní charakter použitých měničů napětí však citelně znehodnocoval vypočtené desetiminutové průměrné hodnoty účinností na fotovoltaické fasádě za nižších hodnot intenzity slunečního záření při měření v měřicích dnech.

Dalším cílem diplomové práce bylo porovnání FVF, instalované na Technické univerzitě v Liberci, s obdobnými aplikacemi instalovanými na dalších univerzitách v České republice v rámci programu Evropské unie s názvem PV Enlargement. Z hlediska použitého fotovoltaického systému jsou srovnatelné pouze instalace na VUT v Brně a ZČU v Plzni. Instalace na MFF UK v Praze a VŠB-TU v Ostravě používají jiné měniče napětí a představují jiné elektrické zapojení. Používají však shodné nebo výkonově podobné fotovoltaické moduly o shodném počtu, tj. celková plocha fotovoltaických sestav je shodná. Zásadně se však odlišují od FVF vyšším výkonem instalace a prostorovou orientací, kdy při rozdílném azimutu jsou fotovoltaické sestavy skloněny pod úhlem 45° , zatímco FVF má sklon 90° . Bylo zjištěno, že v souladu s předpoklady byla výtěžnost FVF s **626,1 kWh/kW_p** nejnižší, přičemž ostatní fotovoltaické instalace dosahují výtěžnost přibližně okolo **1000 kWh/kW_p**. Nejeфекtivněji pracuje fotovoltaická instalace na ZČU v Plzni, která dosáhla výtěžnost **1180,2 kWh/kW_p**. V absolutních číslech vychází toto srovnání pro jednotlivé fotovoltaické instalace následovně: TU v Liberci – **11,7 MWh**, VŠB-TU v Ostravě – **19,6 MWh**, MFF UK v Praze – **20,5 MWh**, VUT v Brně – **20,3 MWh** a ZČU v Plzni – **24,0 MWh**.

Protože jednotlivé fotovoltaické instalace nejsou z důvodu rozdílného použitého systému, rozdílné prostorové orientace a rozdílných klimatických podmínek zcela srovnatelné, byl proveden přepočet vyprodukované elektrické energie jednotlivými instalacemi na jednotné srovnávací podmínky. Za srovnávací podmínky byly zvoleny podmínky fotovoltaické instalace na ZČU v Plzni. V případě zahrnutí vlivu prostorové orientace a klimatických podmínek vychází srovnání jednotlivých fotovoltaických instalací následovně: TU v Liberci – **17,4 MWh**, VŠB-TU v Ostravě – **17,2 MWh**, MFF UK v Praze – **20,1 MWh**, VUT v Brně – **18,9 MWh** a ZČU v Plzni – **24,0 MWh**. V případě zahrnutí i vlivu použité techniky fotovoltaického systému vychází srovnání jednotlivých fotovoltaických instalací následovně: TU v Liberci – **23,2 MWh**, VŠB-TU v Ostravě – **19,5 MWh**, MFF UK v Praze – **21,3 MWh**, VUT v Brně – **18,9 MWh** a

ZČU v Plzni – **24,0 MWh**. Z uvedených čísel vyplývá, že FVF dosahuje s ohledem na své možnosti **velmi dobrých výsledků** (viz. graf 7.7).

S předchozím srovnáním pak souvisí návrhy optimalizace systému FVF. Byl zjištěn vážný nedostatek FVF, který spočívá v její prostorové orientaci. Řešením by byla změna konstrukce zavěšení modulů nebo jejich přemístění na střechu budovy a jejich orientování na jih se sklonem 45° . Dalším vážným zjištěným nedostatkem FVF jsou použité starší a méně výkonné fotovoltaické moduly. Řešením by byla náhrada těchto modulů novějším typem a následně úprava elektrického zapojení modulů. Tento krok by však byl z ekonomického hlediska pravděpodobně neefektivní. Další nedostatky FVF zjištěny nebyly. V případě optimalizace FVF lze navrhnout vytřídění již použitých fotovoltaických modulů a jejich přeskupení do sekcí se srovnatelnými parametry nebo kaskádní řazení měničů napětí dle jejich okamžitého vytížení.

Z ekonomického hlediska bylo zjištěno, že FVF není ekonomicky efektivní a tudíž ani komerčně zajímavou alternativou konvenčním zdrojům elektrické energie. Nákladová cena vyrobené elektrické energie vztažená k době garance výkonu FVF přesahuje **41 Kč/kWh**, zatímco přínos v roce 2005 dosahoval **7,9 Kč/kWh** vyrobené elektrické energie (viz. tab. 9.1, tab. 9.2). Za stávajících legislativních a kritériálních podmínek může být fotovoltaická instalace ekonomicky efektivní, bude-li její měrná cena **< 115 Kč/W_p**, garance výkonu fotovoltaických modulů **> 20 let** a výtěžnost fotovoltaické instalace **> 1000 kWh/kW_p**. Z environmentálního hlediska bylo zjištěno, že přínos FVF je sice malý, nikoliv však zanedbatelný. Za měřicí období bylo provozem FVF uspořeno **0,87 kg** tuhých látek, **9,8 kg SO₂**, **2,8 kg NO_x**, **0,3 kg CO** a **13 707 kg CO₂**.

Po zhodnocení všech aspektů, které byly v diplomové práci ve vztahu k fotovoltaiice zmíněny, je zřejmé, že výroba el. energie ze slunečního záření nemá před sebou jednoduchou budoucnost. Nízká výkonová hustota sluneční energie a její časová nestálost budou pravděpodobně nejvíce bránit většímu rozšíření fotovoltaických instalací v energeticky náročnějších aplikacích. Je proto nezbytné investovat do dalšího výzkumu zařízení na využívání energie slunečního záření, a to ruku v ruce s efektivnějším využíváním již vyrobené energie. Právě tyto dvě cesty mohou omezit další růst entropie v energetickém systému Země. Měly by proto být součástí strategie trvale udržitelného rozvoje energetiky.

SEZNAM LITERATURY

- [1] HENZE, Andreas; HILLEBRAND, Werner. Elektrický proud ze slunce. Ostrava. HEL. 2000.
- [2] CIHELKA, Jaromír. Sluneční vytápěcí systémy. Praha. SNTL. 1984.
- [3] FEJFAR, Antonín. Fotovoltaické články pro využití sluneční energie. Dostupné na WWW: < www.otevrena-veda.cz/ImgPageC1/Fyzika/10fejfar.pdf >.
- [4] ECKERTO VÁ, Ludmila. Albert Einstein a fotoefekt. Dostupné na WWW: < <http://www.cscasfyz.fzu.cz/2005/03/211.html> >.
- [5] KLECZEK, Josip. Slunce a jeho energie. Dostupné na WWW: < <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1948&h=13&pl=49> >.
- [6] ŘEHÁK, Jaromír; BÁRTEK, Jiří; BAŘINKA, Radim. Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování. Dostupné na WWW: < www.ceacr.cz/?download=1998/98_8050.pdf >.
- [7] KLECZEK, Josip. Naše Slunce. Praha. Albatros. 1984.
- [8] VANĚČEK, Milan. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou. Dostupné na WWW: < http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php >.
- [9] PROCHÁZKA, Zdenek. Optimalizace zatěžování solárních měničů energie v reálných provozních podmínkách. Dostupné na WWW: < <http://energyspectrum.net/frame1.htm> >.
- [10] PÁTEK, Miroslav; PARDUBSKÝ, Martin. Štruktúra a vlastnosti fotovoltaických článkov na báze GaAs. Dostupné na WWW: < http://kre.elf.stuba.sk/konferencie/SVOC_2002/Jadro_tech_a_elmat_ing/ >.
- [11] MOTLÍK, Jan; ŠAMÁNEK, Libor; ŠTEKL; et al. Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice. ČEZ. Praha. 2003.
- [12] KAMINSKÝ, Jaroslav; VRTEK, Mojmir. Obnovitelné a alternativní zdroje energie. Skripta VŠB-TU Ostrava. Dostupné na WWW: < <http://www.vsb.cz/ke/vyuka/AOZE/Bc-AOZE1/Skripta.pdf> >.
- [13] Sdružení ALDEBARAN GROUP FOR ASTROPHYSICS. Sluneční soustava. Dostupné na WWW: < <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/slunce.html> >.
- [14] Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů).

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1:** Souborový formát pro PE Monitoring Data
- Příloha č. 2:** Kontrolní měření ze dne 10. října 2005
- Příloha č. 3:** Průběh střední intenzity slunečního záření ze dne 10. října 2005
- Příloha č. 4:** Průběh střední teploty venkovního vzduchu ze dne 10. října 2005
- Příloha č. 5:** Kontrolní měření ze dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 6:** Průběh střední intenzity slunečního záření ze dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 7:** Průběh střední teploty venkovního vzduchu ze dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 8:** Kontrolní měření ze dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 9:** Průběh střední intenzity slunečního záření ze dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 10:** Průběh střední teploty venkovního vzduchu ze dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 11:** Průběh energetických toků měřených na FVF dne 10. října 2005
- Příloha č. 12:** Sumarizace energií měřená na FVF dne 10. října 2005
- Příloha č. 13:** Hodinové průměry účinnosti FVF ze dne 10. října 2005
- Příloha č. 14:** Průběh účinnosti měniče napětí na FVF ze dne 10. října 2005
- Příloha č. 15:** Průběh energetických toků měřených na FVF dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 16:** Sumarizace energií měřená na FVF dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 17:** Hodinové průměry účinnosti FVF ze dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 18:** Průběh účinnosti měniče napětí na FVF ze dne 8. listopadu 2005
- Příloha č. 19:** Průběh energetických toků měřených na FVF dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 20:** Sumarizace energií měřená na FVF dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 21:** Hodinové průměry účinnosti FVF ze dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 22:** Průběh účinnosti měniče napětí na FVF ze dne 23. listopadu 2005
- Příloha č. 23:** Závislost napětí U_m modulů FVF na teplotě
- Příloha č. 24:** Závislost proudu I_m modulů FVF na teplotě
- Příloha č. 25:** Časový průběh vyrobené energie FVF v době od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 26:** Sumy měsíční vyrobené energie FVF od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 27:** Průběh globálního slunečního záření G_h naměřeného na FVF v období od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 28:** Průběh intenzity slunečního záření G_i v rovině FVF naměřeného v období od 17.11.04 do 31.11.05

- Příloha č. 29:** Časový průběh vyrobené energie FVF v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 30:** Sumy denní vyrobené energie FVF v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 31:** Průběh globálního slunečního záření G_h naměřeného na FVF v listopadu 2005
- Příloha č. 32:** Četnosti výskytu hodnot globálního slunečního záření naměřeného na FVF v listopadu 2005
- Příloha č. 33:** Průběh intenzity slunečního záření G_i v rovině FVF naměřeného v listopadu 2005
- Příloha č. 34:** Četnosti výskytu hodnot intenzity slunečního záření v rovině FVF naměřeného v listopadu 2005
- Příloha č. 35:** Časový průběh vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě v době od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 36:** Sumy měsíční vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 37:** Časový průběh vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 38:** Sumy denní vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 39:** Časový průběh vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze v době od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 40:** Sumy měsíční vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 41:** Časový průběh vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 42:** Sumy denní vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 43:** Časový průběh vyrobené energie FVI na VUT v Brně v době od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 44:** Sumy měsíční vyrobené energie FVI na VUT v Brně od 17.11.04 do 31.11.05
- Příloha č. 45:** Časový průběh vyrobené energie FVI na VUT v Brně v měsíci listopadu 2005
- Příloha č. 46:** Sumy denní vyrobené energie FVI na VUT v Brně v listopadu 2005

Příloha č. 47: Časový průběh vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni v době od 19.11.04 do 31.11.05

Příloha č. 48: Sumy měsíční vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni od 19.11.04 do 31.11.05

Příloha č. 49: Časový průběh vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni v měsíci listopadu 2005

Příloha č. 50: Sumy denní vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni v listopadu 2005

Příloha č. 51: Výkonový poměr R_p fotovoltaické fasády na TU v Liberci

Příloha č. 52: Výtěžnost Y_{PVS} fotovoltaické fasády na TU v Liberci

Příloha č. 53: Střední výkon P_s fotovoltaické fasády na TU v Liberci

Příloha č. 54: Faktory použité pro porovnání vyrobené energie jednotlivými FVI

Příloha č. 1: Souborový formát pro PE Monitoring Data

0; SysID; Time; Date; Comment;
1; Gh-h; Gh; Gh-l; Tam-h; Tam; Tam-l; Ws-h; Ws; Wd;
2; Gi-h; Gi; Gi-l; Tref-h; Tref; Tref-l; Ta-h; Ta; Ta-l; Va-h; Va; Va-l; Ia-h; Ia; Ia-l; Pa-h; Pa; Pa-l;
3; Pio-h; Pio; Pio-l;
4; Ptu;
5; C-time;

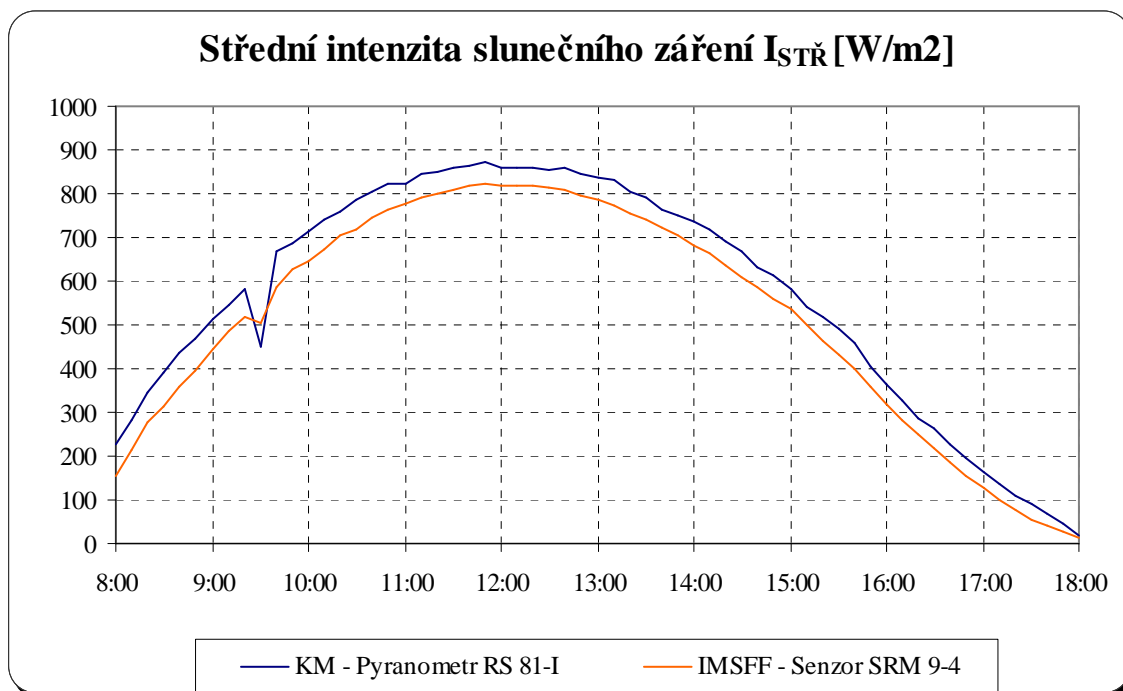
Annex:

	0	Integer	# Line Number (=0)
	SysID	Word	# System Identification Number
	Time	hh:mm:ss	# Time of Recording
	Date	dd/mm/yyyy	# Date of Recording
	Comment	String	# System Identification Name e.g. 3GC10 (3 Sub-systems, Grid Connected, Installed Power 10kWp)
<hr/>			
	1	Integer	# Line Number (=1)
A2 Sensor2	Gh-h	W/m ²	# Total Irradiation on Horizontal Plane Maximum
	Gh	W/m ²	# Total Irradiation on Horizontal Plane
	Gh-l	W/m ²	# Total Irradiation on Horizontal Plane Minimum
A6 Sensor6	Tam-h	°C	# Ambient Temperature in the Shade Maximum
	Tam	°C	# Ambient Temperature in the Shade
	Tam-l	°C	# Ambient Temperature in the Shade Minimum
	Ws-h	m/s	# Wind Speed Maximum
	Ws	m/s	# Wind Speed
	Wd	deg	# Wind Direction (N=0, S=180)
<hr/>			
	2	Integer	# Line Number (=2)
A1a Sensor0	Gi-h	W/m ²	# PV Generator Array Plane Irradiation Maximum;
	Gi	W/m ²	# PV Generator Array Plane Irradiation
	Gi-l	W/m ²	# PV Generator Array Plane Irradiation Minimum
A1b Sensor1	Tref-h	°C	# Reference Sensor Temperature Maximum
	Tref	°C	# Reference Sensor Temperature
	Tref-l	°C	# Reference Sensor Temperature Minimum
A3 Sensor3	Ta-h	°C	# PV Generator Cell Temperature Maximum
	Ta	°C	# PV Generator Cell Temperature
	Ta-l	°C	# PV Generator Cell Temperature Minimum
A5 Sensor5	Va-h	V	# PV Generator Voltage Maximum
	Va	V	# PV Generator Voltage
	Va-l	V	# PV Generator Voltage Minimum
A4 Sensor 4	Ia-h	A	# PV Generator Current Maximum
	Ia	A	# PV Generator Current
	Ia-l	A	# PV Generator Current Minimum
Calculated	Pa-h	kW	# PV Generator Power Maximum
	Pa	kW	# PV Generator Power
	Pa-l	kW	# PV Generator Power Minimum
<hr/>			
	3	Integer	# Line Number (=3)
D1 Sensor7	Pio-h	kW	# Inverter AC Power Out Maximum
	Pio	kW	# Inverter AC Power Out
	Pio-l	kW	# Inverter AC Power Out Minimum
<hr/>			
	4	Integer	# Line Number (=4)
D3 Sensor8 Via M-Bus	Ptu	kWh	# AC Energy to Utility Grid
<hr/>			
	5	Integer	# Line Number (=5)
Cycle time	C-time	ms	# Time which is required to read-out all values

Příloha č. 2: Kontrolní měření ze dne 10. října 2005

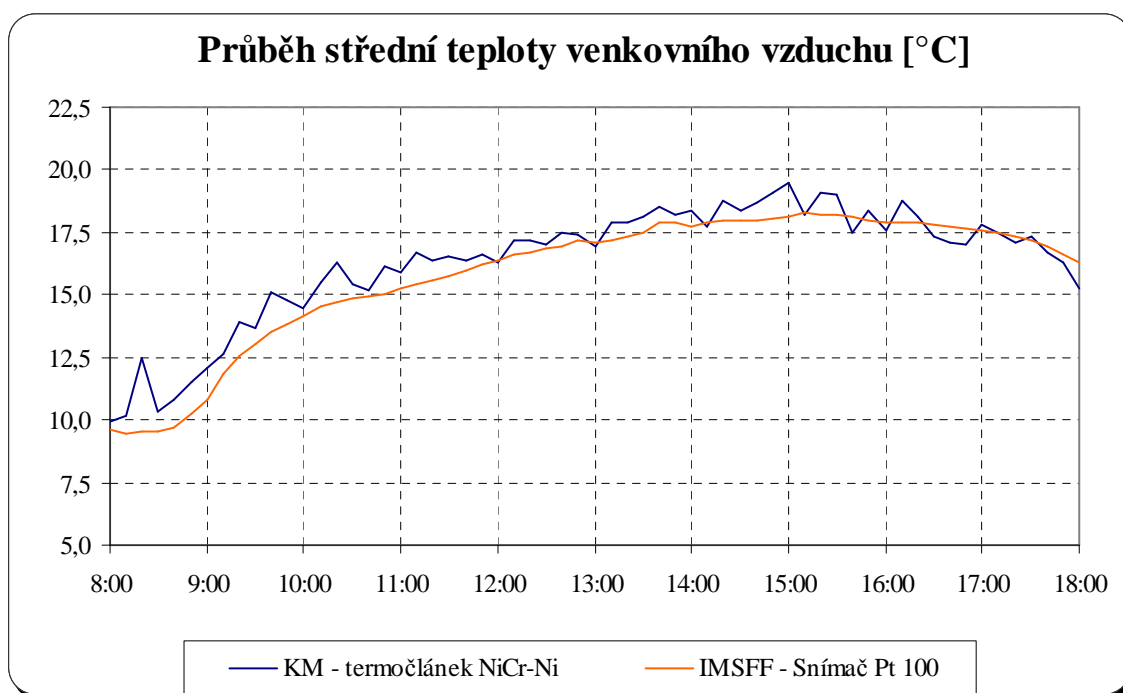
Čas	Měřicí zařízení - KM						Měřicí zařízení - IMSFF					
	Měřicí místo			Naměřené hodnoty		Vypočtené h.	Měřicí místo			Naměřené hodnoty		Vypočtené h.
	01	02	03	Stř. intenzita	Energie	Σ Energie	01	02	03	Stř. intenzita	Energie	Σ Energie
	Pyranometr	Termočlánek	Elektroměr	sl. záření	vyrobená	sl. záření	Senzor A1a	Snímač A6	Elektroměr	sl. záření	vyrobená	sl. záření
[h:min]	[mA]	[°C]	[kWh]	I _{STR} [W/m ²]	E _{VYR} [kWh]	E _{DOP} [kWh]	G _i [W/m ²]	T _{am} [°C]	[kWh]	I _{STR} [W/m ²]	E _{VYR} [kWh]	E _{EDOP} [kWh]
8:00			18850,90	214,0						87,4		
8:30	8,222	10,5	18852,80	316,6	1,90	22,99	267,1	9,5	6762,2	267,1	1,80	19,40
9:00	10,009	11,0	18855,20	450,7	2,40	32,73	399,1	10,2	6764,9	399,1	2,70	28,98
9:30	11,339	13,3	18858,60	550,4	3,40	39,97	503,8	12,5	6768,2	503,8	3,30	36,59
10:00	13,021	14,5	18862,90	676,6	4,30	49,13	618,7	13,8	6772,4	618,7	4,20	44,93
10:30	14,007	15,4	18867,40	750,5	4,50	54,50	698,5	14,7	6777,2	698,5	4,80	50,73
11:00	14,789	15,7	18872,60	809,2	5,20	58,76	762,0	15,1	6782,3	762,0	5,10	55,33
11:30	15,287	16,3	18877,40	846,5	4,80	61,47	801,3	15,6	6787,1	801,3	4,80	58,19
12:00	15,502	16,5	18882,60	862,6	5,20	62,64	819,0	16,2	6792,2	819,0	5,10	59,47
12:30	15,467	17,1	18888,10	860,0	5,50	62,45	817,3	16,7	6797,9	817,3	5,70	59,35
13:00	15,325	17,3	18893,70	849,4	5,60	61,68	797,5	17,1	6803,3	797,5	5,40	57,91
13:30	14,833	17,7	18899,00	812,5	5,30	59,00	754,3	17,3	6808,7	754,3	5,40	54,78
14:00	14,095	18,2	18904,00	757,1	5,00	54,98	703,3	17,8	6813,8	703,3	5,10	51,07
14:30	13,404	18,3	18908,50	705,3	4,50	51,22	636,8	17,9	6818,3	636,8	4,50	46,24
15:00	12,203	18,7	18912,00	615,2	3,50	44,68	560,7	18,1	6821,9	560,7	3,60	40,72
15:30	11,106	18,6	18915,10	532,9	3,10	38,70	465,6	18,2	6824,9	465,6	3,00	33,81
16:00	9,719	18,0	18917,80	428,9	2,70	31,15	358,9	18,0	6827,6	358,9	2,70	26,06
16:30	8,073	17,8	18919,60	305,4	1,80	22,18	249,9	17,8	6829,4	249,9	1,80	18,15
17:00	6,765	17,5	18920,60	207,4	1,00	15,06	154,8	17,6	6830,3	154,8	0,90	11,24
17:30	5,654	17,0	18921,00	124,0	0,40	9,01	77,8	17,3	6830,9	77,8	0,60	5,65
18:00	4,735	16,1	18921,00	55,1	0,00	4,00	26,7	16,6	6830,9	26,7	0,00	1,94
16,3 575,8 70,10 836,32 15,9 523,6 70,50 760,54												
Měřicí zařízení - KM (kontrolní měřicí zařízení)				Měřicí zařízení - IMSFF (indikační a měřicí systém fotovoltaické fasády)				Doplňující údaje:				
01-Pyranometr RS 81-I				01-Senzor SRM 9-4				Plocha solárního čl. 0,0105 m ²				
02-Termočlánek NiCr-Ni				02-Teploměrný snímač Pt 100				Počet čl. na modulu 72 ks				
03-Elektroměr ETS 429 SIL				03-Elektroměr EIZ-EDWC 7390, uvedeny jsou přepočtené hodnoty				Čistá plocha modulu 0,76 m ²				
Měřicí ústředna Almemo 2290-8				Měřicí ústředna UDAS 1001E				Počet modulů 192 ks				
PC - Notebook				Stolní PC sestava, program PE Monitoring Data				Plocha modulů celková čistá 145,2 m ²				
												Směrnice pyranometru 75 (-)

Příloha č. 3: Průběh střední intenzity slunečního záření ze dne 10. října 2005



Korelační koeficient pro měření střední intenzity slunečního záření $\rho_{IMSFF, KM} = 0,997$ [-]

Příloha č. 4: Průběh střední teploty venkovního vzduchu ze dne 10. října 2005

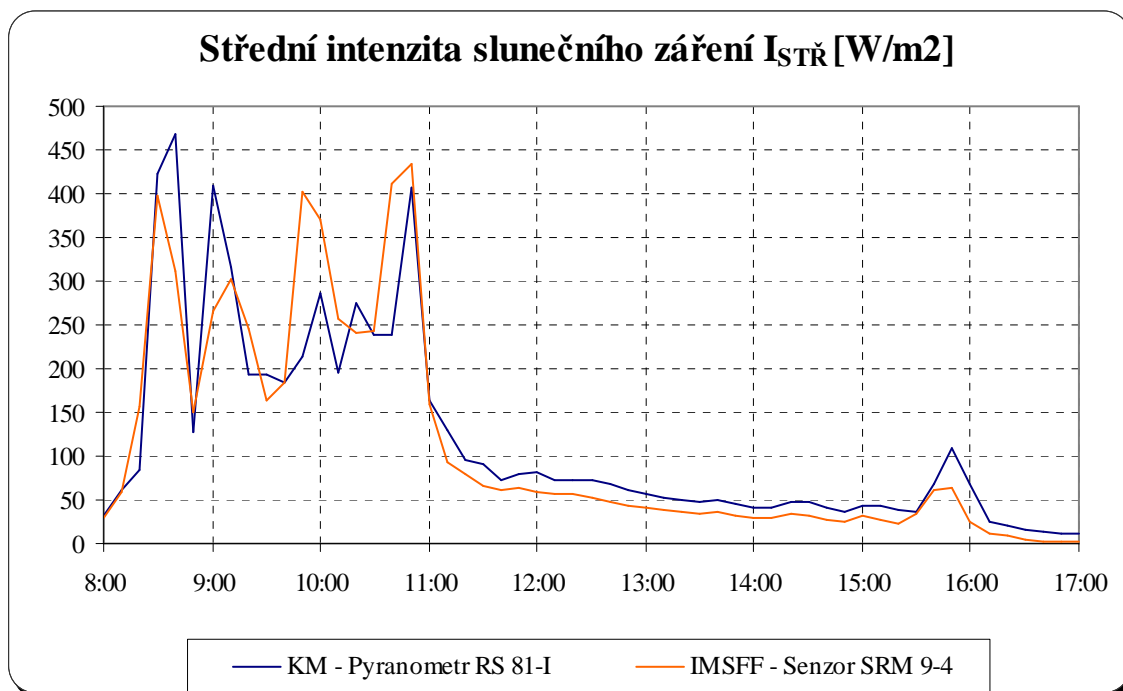


Korelační koeficient pro měření střední teploty venkovního vzduchu $\rho_{IMSFF, KM} = 0,971$ [-]

Příloha č. 5: Kontrolní měření ze dne 8. listopadu 2005

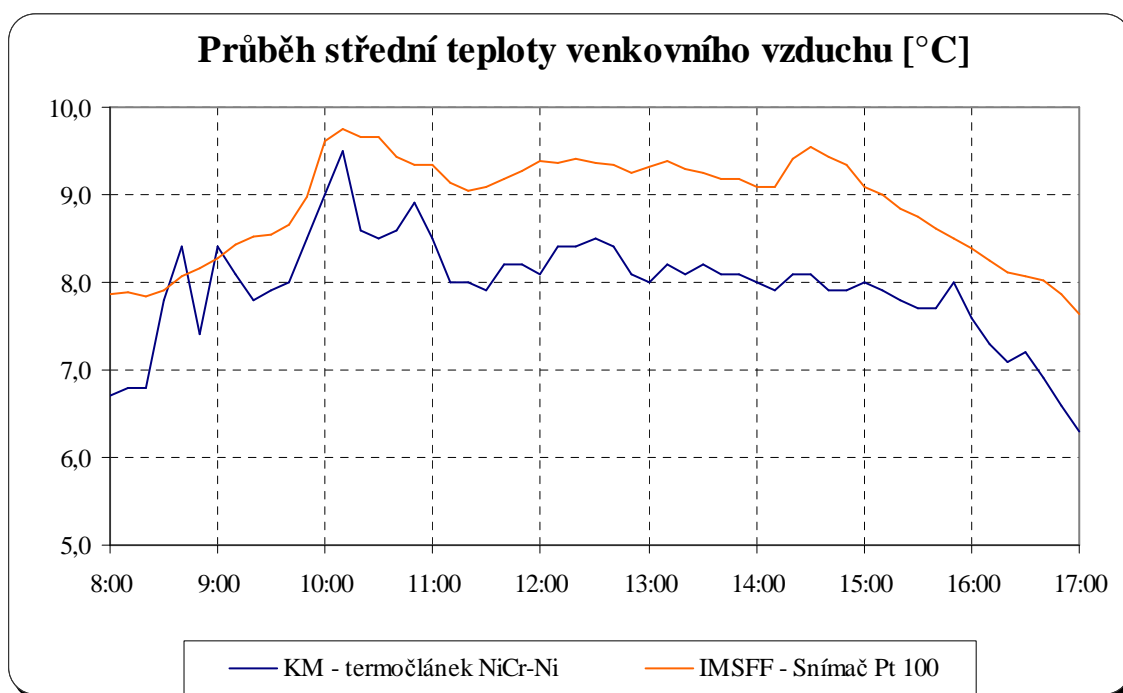
Čas	Měřicí zařízení - KM						Měřicí zařízení - IMSFF					
	Měřicí místo			Naměřené hodnoty			Měřicí místo			Naměřené hodnoty		
	01	02	03	Stř. intenzita	Energie	Σ Energie	01	02	03	Stř. intenzita	Energie	Σ Energie
	Pyranometr	Termočlánek	Elektroměr	sl. záření	vyrobená	sl. záření	Senzor A1a	Snímač A6	Elektroměr	sl. záření	vyrobená	sl. záření
[h:min]	[mA]	[°C]	[kWh]	I_{STR} [W/m ²]	E_{VVR} [kWh]	E_{DOP} [kWh]	G_i [W/m ²]	T_{am} [°C]	[kWh]	I_{STR} [W/m ²]	E_{VVR} [kWh]	E_{DOP} [kWh]
8:00			19931,25	25,2						18,8		
8:30	6,529	7,1		189,7		13,77	204,6	7,9	7846,7	204,6	1,50	14,86
9:00	8,461	8,1	19935,40	334,6	4,15	24,29	242,8	8,2	7848,8	242,8	2,10	17,63
9:30	7,112	7,9		233,4		16,95	237,0	8,5	7850,6	237,0	1,80	17,21
10:00	7,044	8,5	19939,60	228,3	4,20	16,58	319,0	9,1	7853,6	319,0	3,00	23,17
10:30	7,149	8,9		236,2		17,15	246,8	9,7	7855,7	246,8	2,10	17,92
11:00	7,602	8,7	19944,10	270,1	4,50	19,62	335,2	9,4	7858,1	335,2	2,40	24,34
11:30	5,400	8,0		105,0		7,63	80,2	9,1	7858,7	80,2	0,60	5,82
12:00	5,036	8,2	19945,00	77,7	0,90	5,64	62,1	9,3	7859,0	62,1	0,30	4,51
12:30	4,968	8,4		72,6		5,27	55,4	9,4	7859,3	55,4	0,30	4,02
13:00	4,823	8,2	19945,55	61,7	0,55	4,48	44,2	9,3	7859,6	44,2	0,30	3,21
13:30	4,669	8,2		50,2		3,65	36,4	9,3	7859,6	36,4	0,00	2,64
14:00	4,616	8,1	19945,80	46,2	0,25	3,36	32,1	9,2	7859,9	32,1	0,30	2,33
14:30	4,609	8,0		45,7		3,32	31,7	9,3	7859,9	31,7	0,00	2,30
15:00	4,531	7,9	19945,90	39,8	0,10	2,89	28,1	9,3	7859,9	28,1	0,00	2,04
15:30	4,513	7,8		38,5		2,79	28,4	8,9	7859,9	28,4	0,00	2,06
16:00	5,092	7,8	19946,10	81,9	0,20	5,95	50,9	8,5	7860,2	50,9	0,30	3,69
16:30	4,266	7,2		19,9		1,45	8,5	8,1	7860,2	8,5	0,00	0,62
17:00	4,167	6,6	19946,10	12,6	0,00	0,91	2,6	7,8	7860,2	2,6	0,00	0,19
		8,0		119,1	14,85	155,69		8,9		113,7	15,00	148,57
Měřicí zařízení - KM (kontrolní měřicí zařízení)				Měřicí zařízení - IMSFF (indikacní a měřicí systém fotovoltaické fasády)				Doplňující údaje:				
01-Pyranometr RS 81-I				01-Senzor SRM 9-4				Plocha solárního čl.		0,0105 m ²		
02-Termočlánek NiCr-Ni				02-Tepločerný snímač Pt 100				Počet čl. na modulu		72 ks		
03-Elektroměr ETS 429 SIL				03-Elektroměr EIZ-EDWC 7390, uvedeny jsou přepočtené hodnoty				Čistá plocha modulu		0,76 m ²		
Měřicí ústředna Almemo 2290-8				Měřicí ústředna UDAS 100IE				Počet modulů		192 ks		
PC - Notebook				Stolní PC sestava, program PE Monitoring Data				Plocha modulů celková čistá		145,2 m ²		
								Směrnice pyranometru		75 (-)		

Příloha č. 6: Průběh střední intenzity slunečního záření ze dne 8. listopadu 2005



Korelační koeficient pro měření střední intenzity slunečního záření $\rho_{IMSFF, KM} = 0,910$ [-]

Příloha č. 7: Průběh střední teploty venkovního vzduchu ze dne 8. listopadu 2005

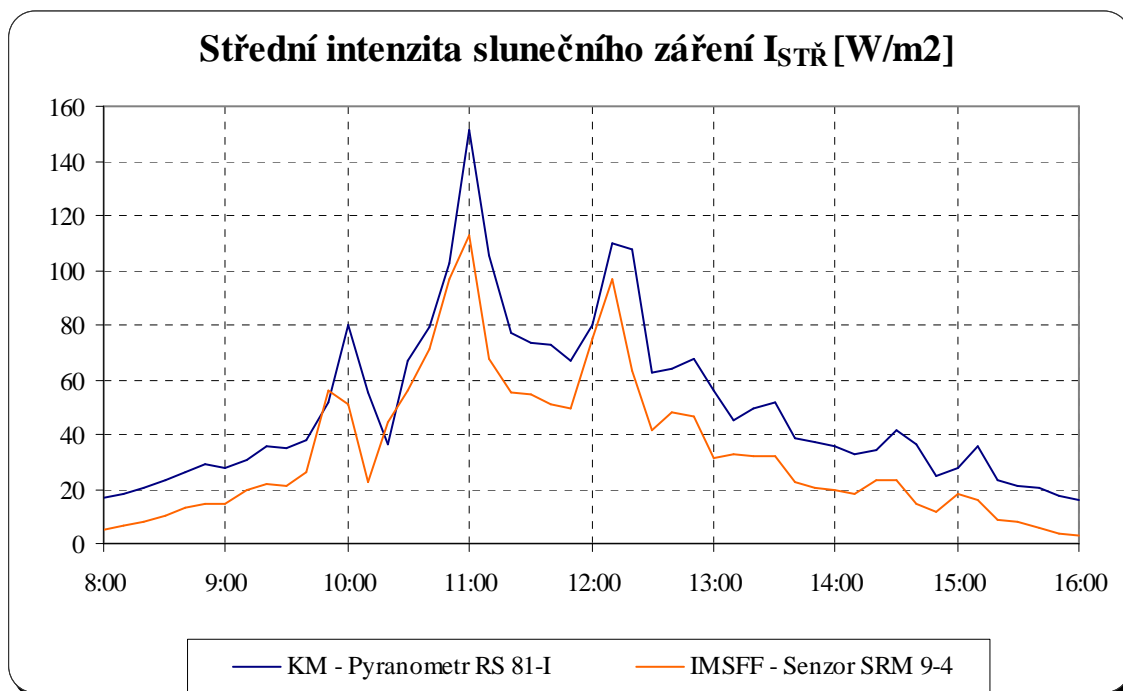


Korelační koeficient pro měření střední teploty venkovního vzduchu $\rho_{IMSFF, KM} = 0,805$ [-]

Příloha č. 8: Kontrolní měření ze dne 23. listopadu 2005

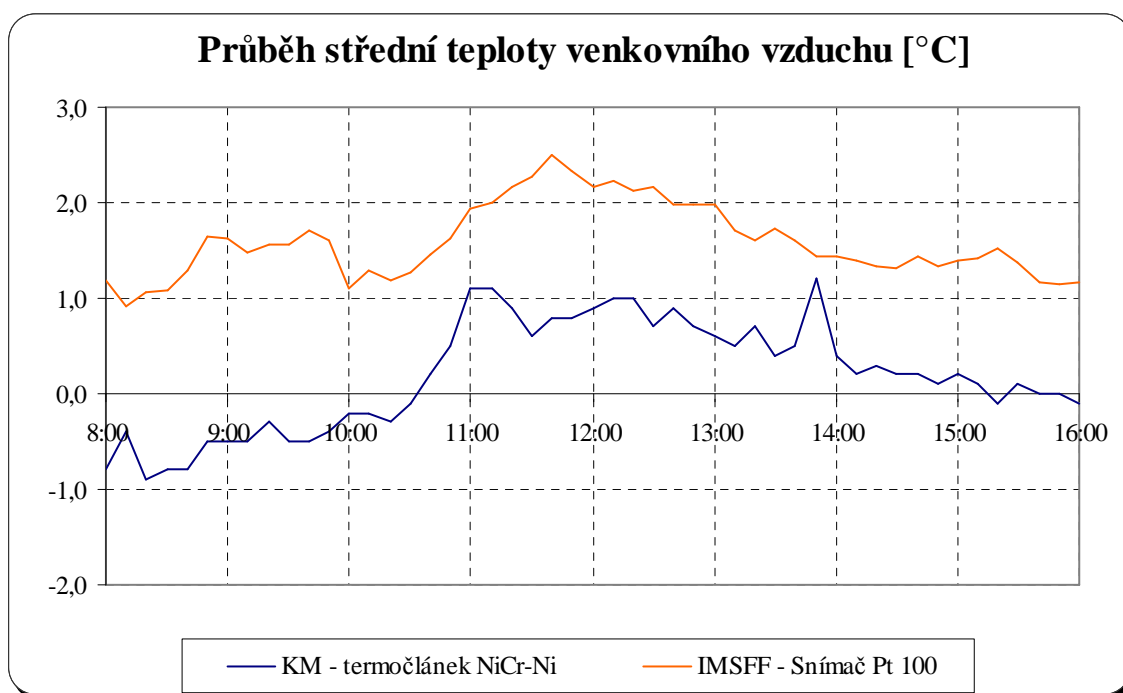
Čas	Měřicí zařízení - KM						Měřicí zařízení - IMSFF					
	Měřicí místo			Naměřené hodnoty			Měřicí místo			Naměřené hodnoty		
	01	02	03	Stř. intenzita	Energie	Σ Energie	01	02	03	Stř. intenzita	Energie	Σ Energie
	Pyranometr	Termočlánek	Elektroměr	sl. záření	vyrobená	sl. záření	Senzor A1a	Snímač A6	Elektroměr	sl. záření	vyrobená	sl. záření
[h:min]	[mA]	[°C]	[kWh]	I_{STR} [W/m ²]	E_{VVR} [kWh]	E_{DOP} [kWh]	G_i [W/m ²]	T_{am} [°C]	[kWh]	I_{STR} [W/m ²]	E_{VVR} [kWh]	E_{DOP} [kWh]
8:00			19984,20	15,9						3,9		
8:30	4,274	-0,7		20,5		1,49	8,4	1,0	7898,0	8,4	0,00	0,61
9:00	4,366	-0,6	19984,20	27,5	0,00	1,99	13,9	1,5	7898,0	13,9	0,00	1,01
9:30	4,451	-0,4		33,8		2,45	20,7	1,5	7898,0	20,7	0,00	1,50
10:00	4,754	-0,4	19984,44	56,6	0,24	4,11	44,3	1,5	7898,3	44,3	0,30	3,21
10:30	4,706	-0,2		52,9		3,84	40,9	1,2	7898,6	40,9	0,30	2,97
11:00	5,479	0,6	19985,30	110,9	0,86	8,05	93,4	1,7	7899,2	93,4	0,60	6,78
11:30	5,137	0,9		85,2		6,19	59,1	2,2	7899,5	59,1	0,30	4,29
12:00	4,975	0,8	19986,10	73,1	0,80	5,31	58,4	2,3	7900,1	58,4	0,60	4,24
12:30	5,244	0,9		93,3		6,78	67,2	2,2	7900,4	67,2	0,30	4,88
13:00	4,835	0,7	19986,70	62,6	0,60	4,55	42,0	2,0	7900,7	42,0	0,30	3,05
13:30	4,651	0,5		48,8		3,54	32,3	1,7	7900,7	32,3	0,00	2,35
14:00	4,494	0,7	19986,80	37,1	0,10	2,69	20,9	1,5	7900,7	20,9	0,00	1,52
14:30	4,480	0,2		36,0		2,61	21,6	1,4	7900,7	21,6	0,00	1,57
15:00	4,392	0,2	19986,80	29,4	0,00	2,13	14,8	1,4	7900,7	14,8	0,00	1,08
15:30	4,357	0,0		26,8		1,94	10,8	1,4	7900,7	10,8	0,00	0,79
16:00	4,239	0,0	19986,80	17,9	0,00	1,30	4,1	1,2	7900,7	4,1	0,00	0,30
		0,2		50,8	2,60	58,99		1,6		34,5	2,70	40,14
<u>Měřicí zařízení - KM (kontrolní měřicí zařízení)</u>				<u>Měřicí zařízení - IMSFF (indikální a měřicí systém fotovoltaické fasády)</u>				<u>Doplňující údaje:</u>				
01-Pyranometr RS 81-I				01-Senzor SRM 9-4				Plocha solárního čl.		0,0105 m ²		
02-Termočlánek NiCr-Ni				02-Teploměrný snímač Pt 100				Počet čl. na modulu		72 ks		
03-Elektroměr ETS 429 SIL				03-Elektroměr EIZ-EDWC 7390, uvedeny jsou přepočtené hodnoty				Čistá plocha modulu		0,76 m ²		
Měřicí ústředna Almemo 2290-8				Měřicí ústředna UDAS 1001E				Počet modulů		192 ks		
PC - Notebook				Stolní PC sestava, program PE Monitoring Data				Plocha modulů celková čistá		145,2 m ²		
								Směrnice pyranometru		75 (-)		

Příloha č. 9: Průběh střední intenzity slunečního záření ze dne 23. listopadu 2005



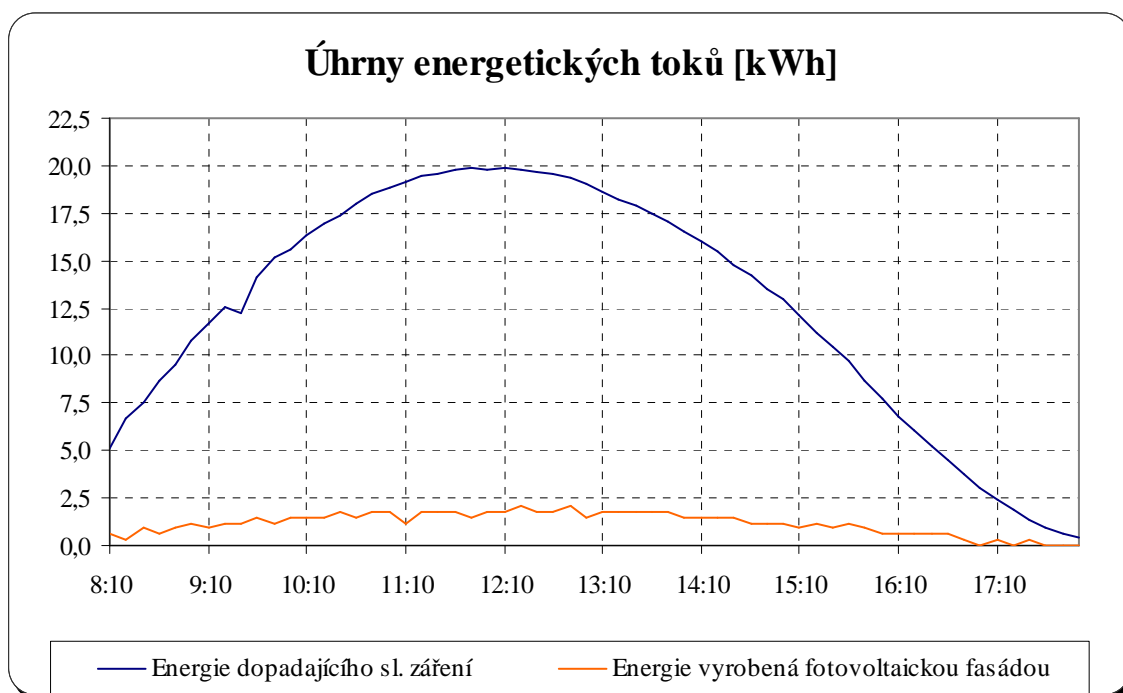
Korelační koeficient pro měření střední intenzity slunečního záření $\rho_{IMSFF, KM} = 0,953$ [-]

Příloha č. 10: Průběh střední teploty venkovního vzduchu dne 23. listopadu 2005

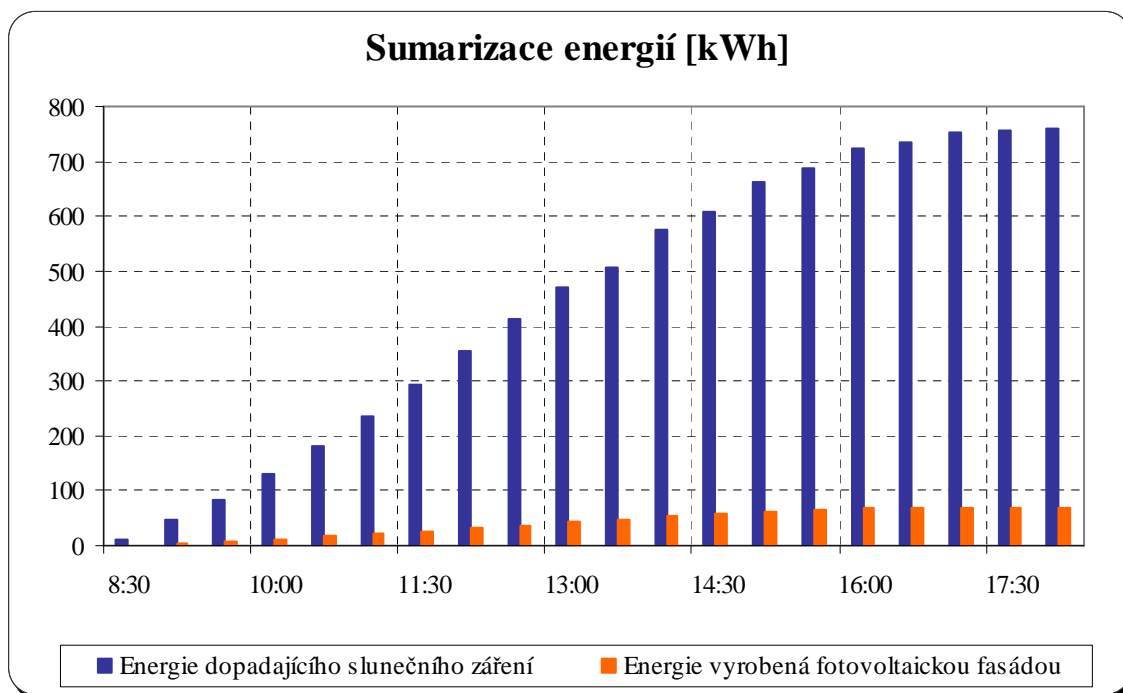


Korelační koeficient pro měření střední teploty venkovního vzduchu $\rho_{IMSFF, KM} = 0,709$ [-]

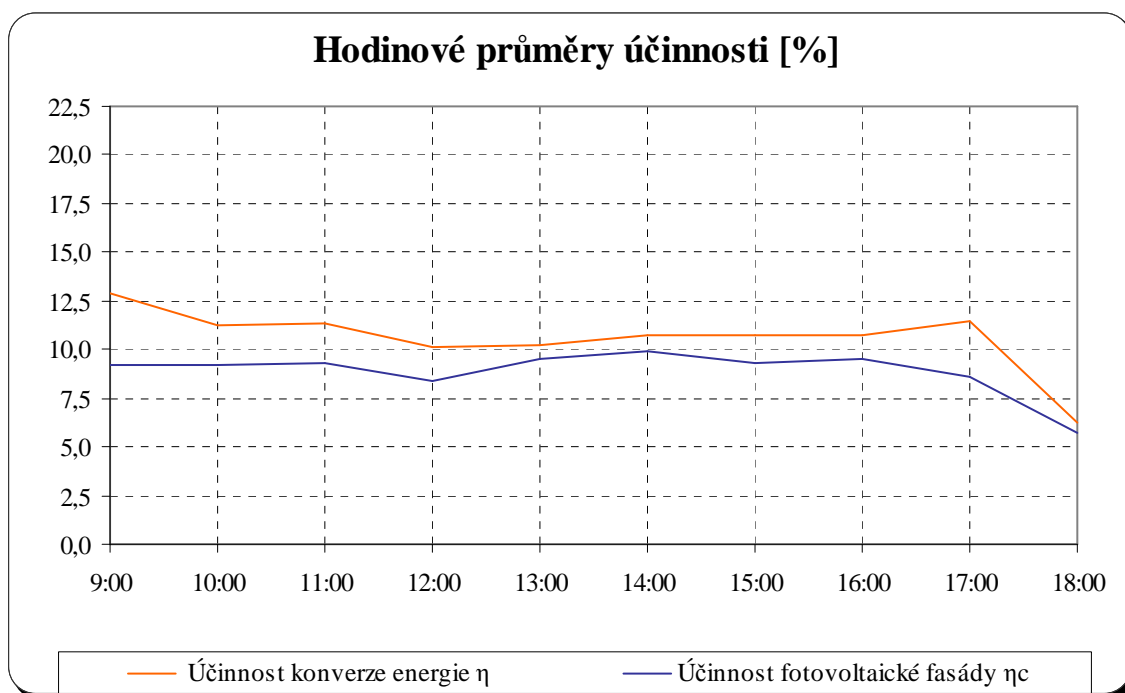
Příloha č. 11: Průběh energetických toků měřených na FVF dne 10. října 2005



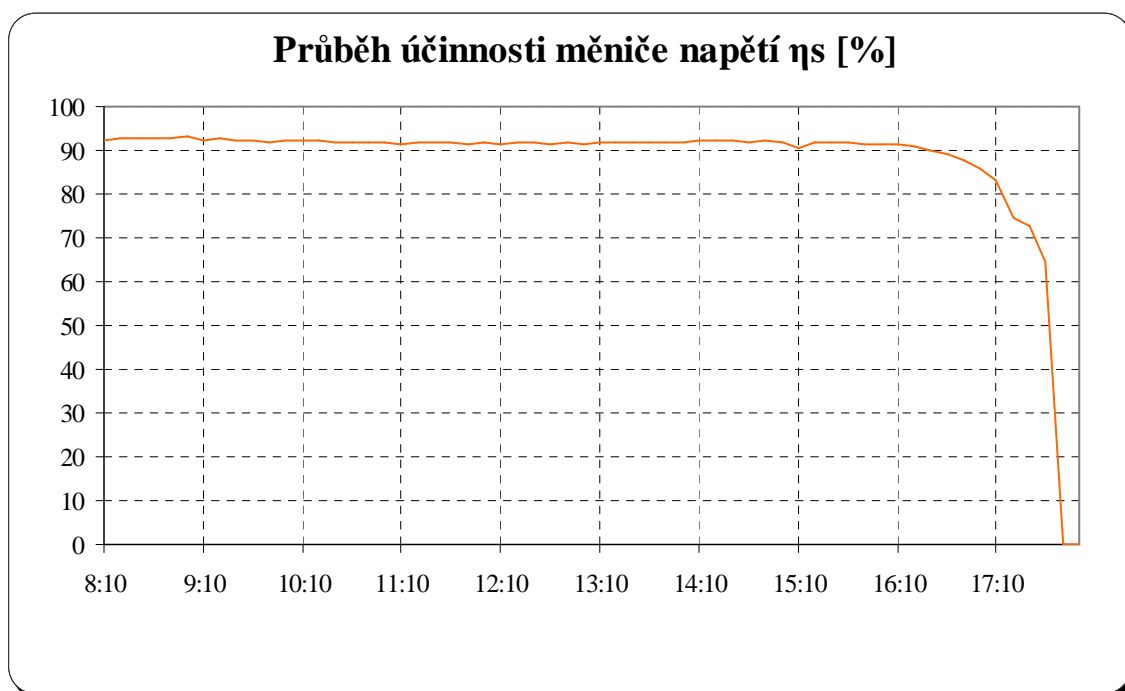
Příloha č. 12: Sumarizace energií měřená na FVF dne 10. října 2005



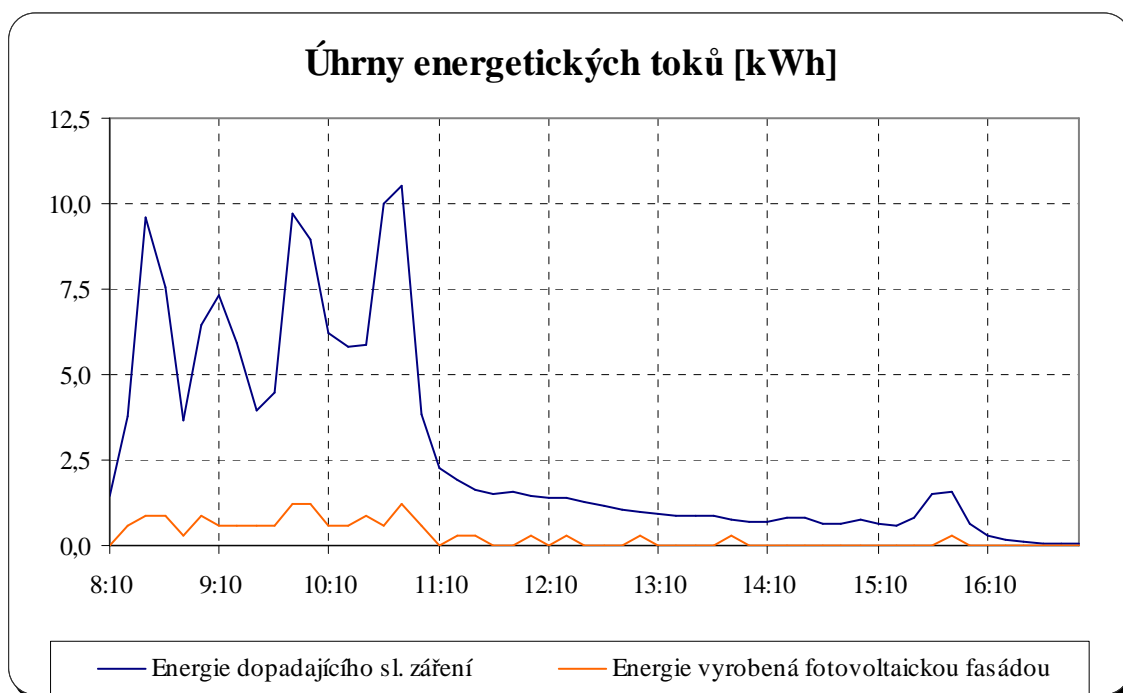
Příloha č. 13: Hodinové průměry účinnosti FVF ze dne 10. října 2005



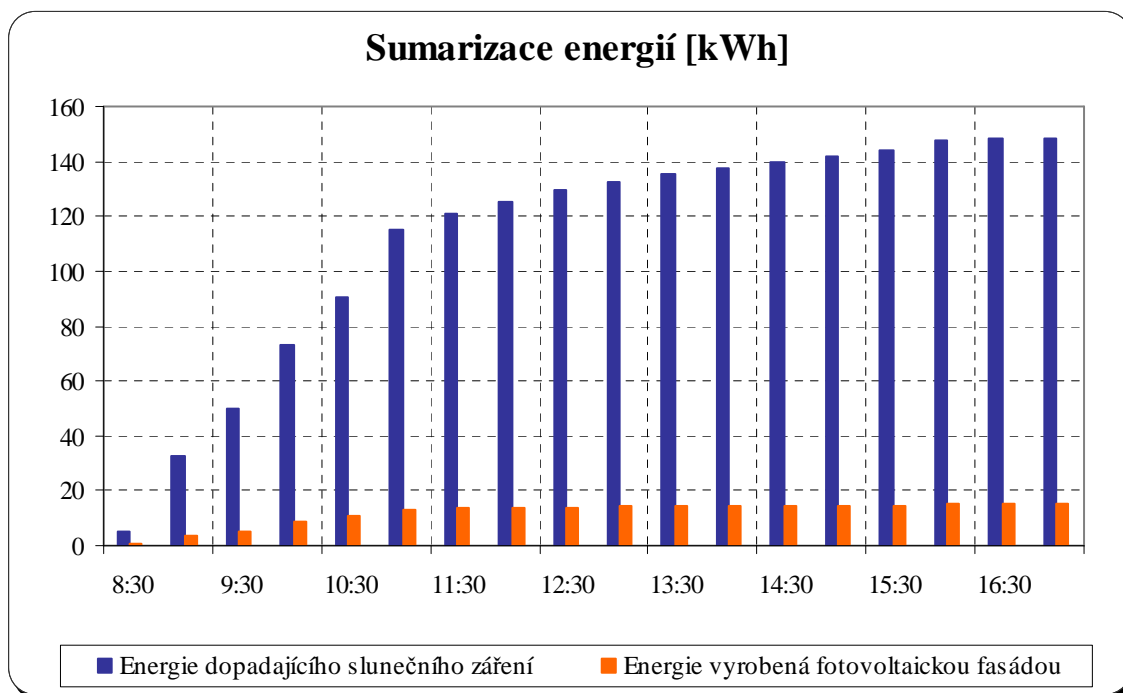
Příloha č. 14: Průběh účinnosti měniče napětí na FVF ze dne 10. října 2005



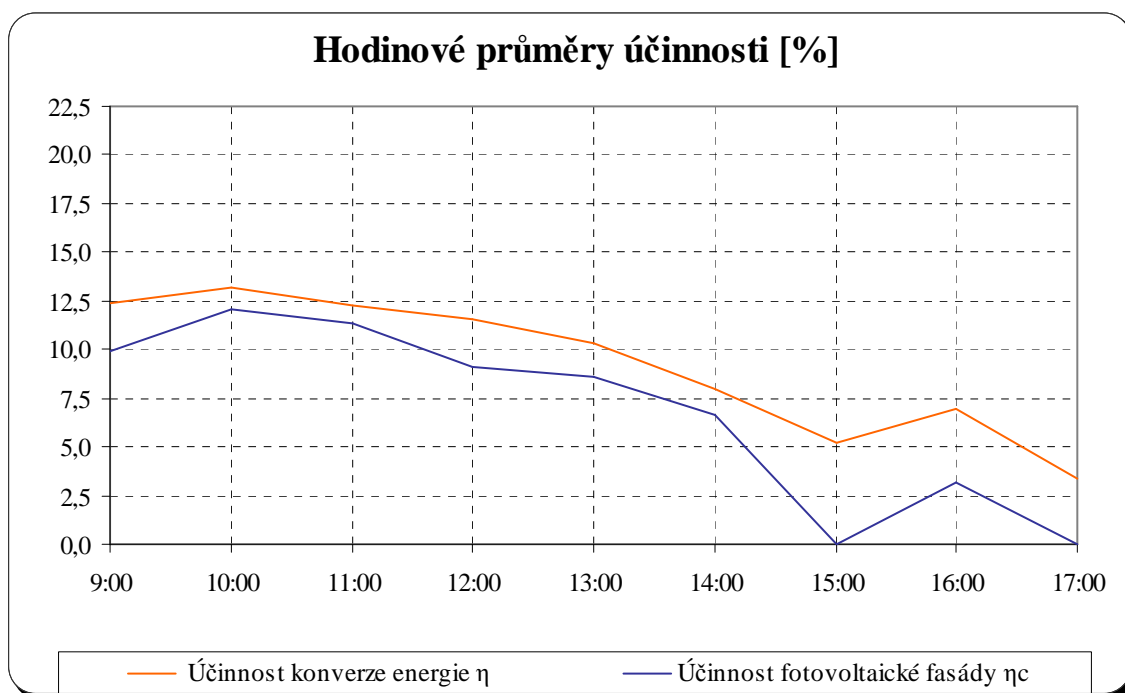
Příloha č. 15: Průběh energetických toků měřených na FVF dne 8. listopadu 2005



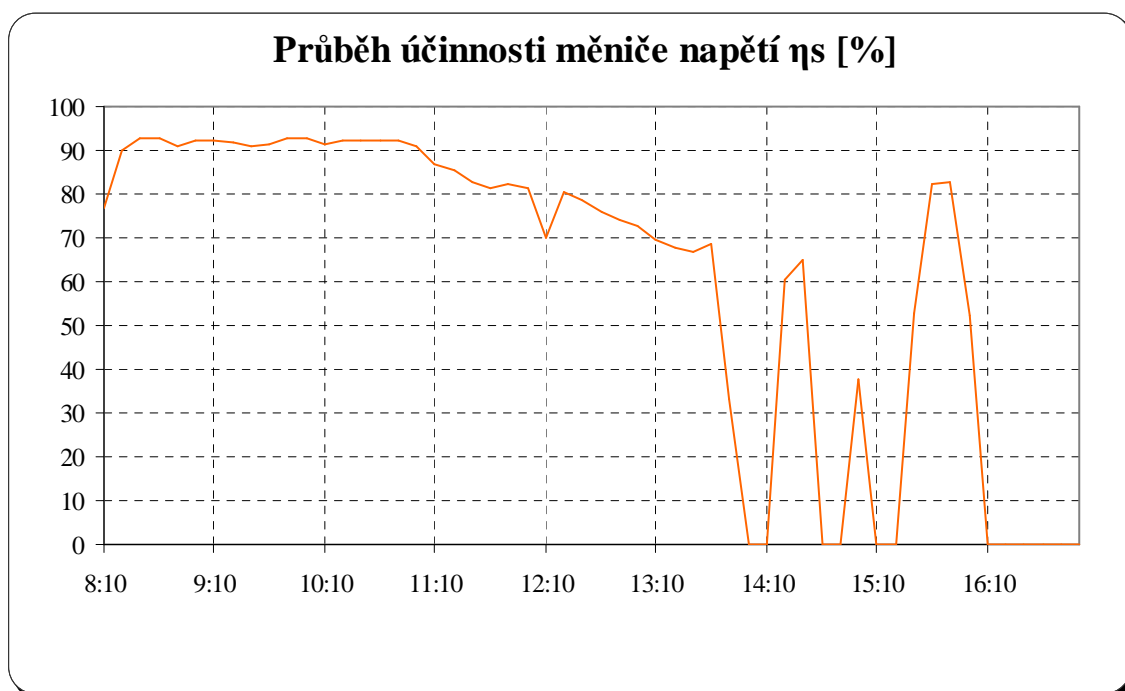
Příloha č. 16: Sumarizace energií měřená na FVF dne 8. listopadu 2005



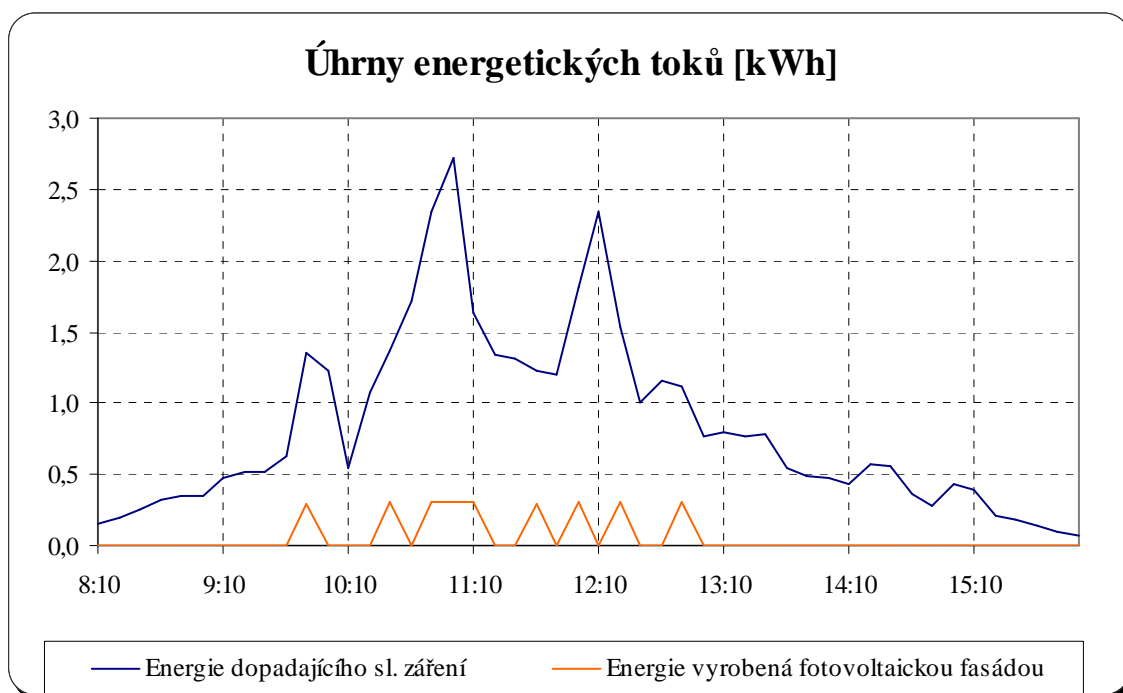
Příloha č. 17: Hodinové průměry účinnosti FVF ze dne 8. listopadu 2005



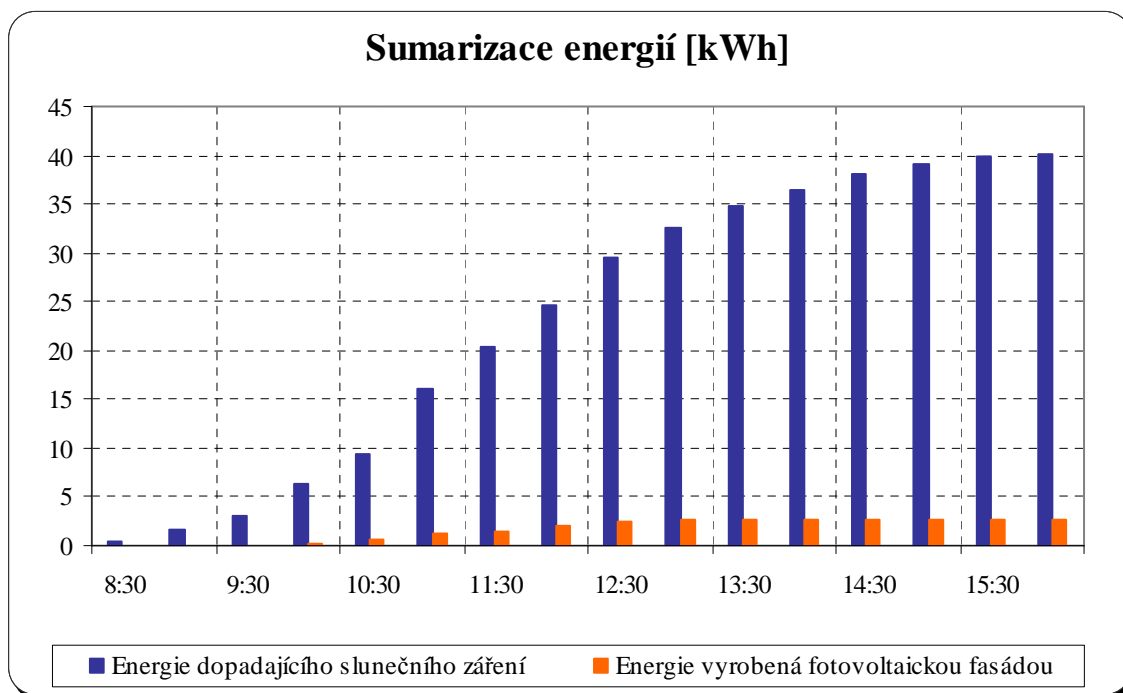
Příloha č. 18: Průběh účinnosti měniče napětí na FVF ze dne 8. listopadu 2005



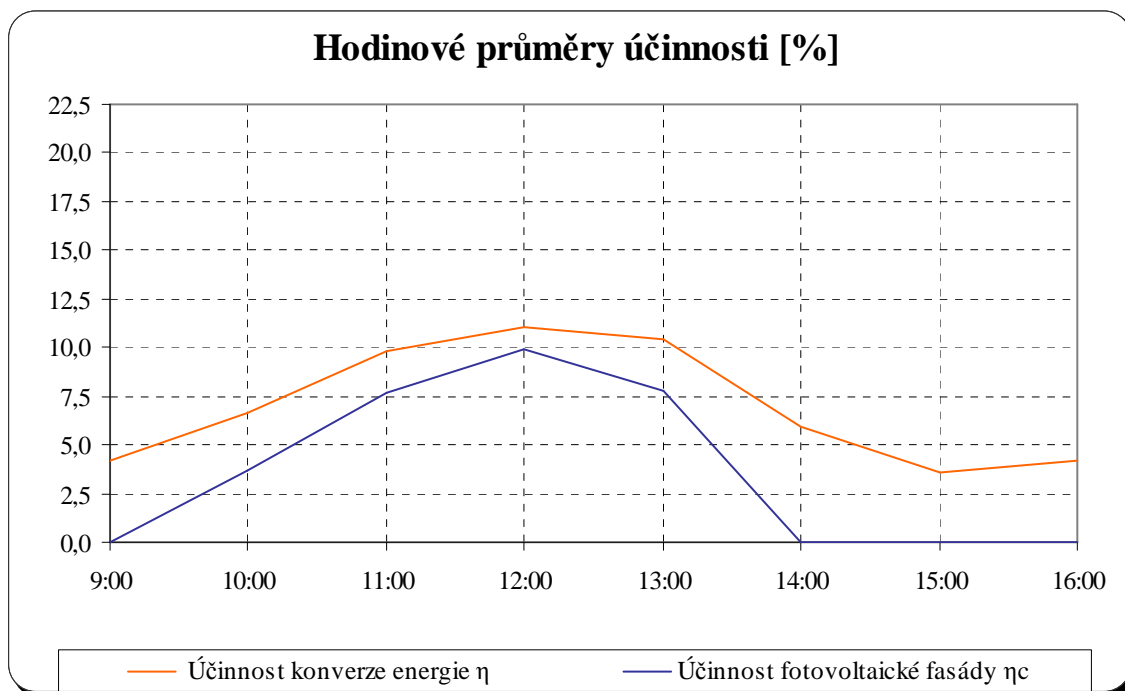
Příloha č. 19: Průběh energetických toků měřených na FVF dne 23. listopadu 2005



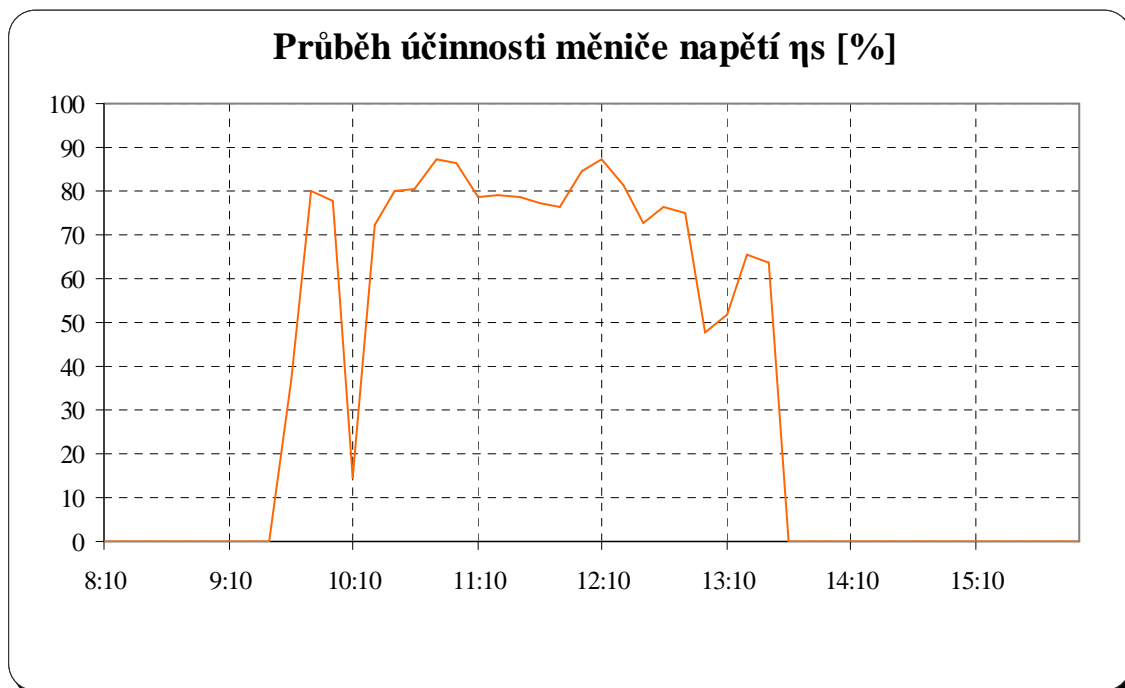
Příloha č. 20: Sumarizace energií měřená na FVF dne 23. listopadu 2005



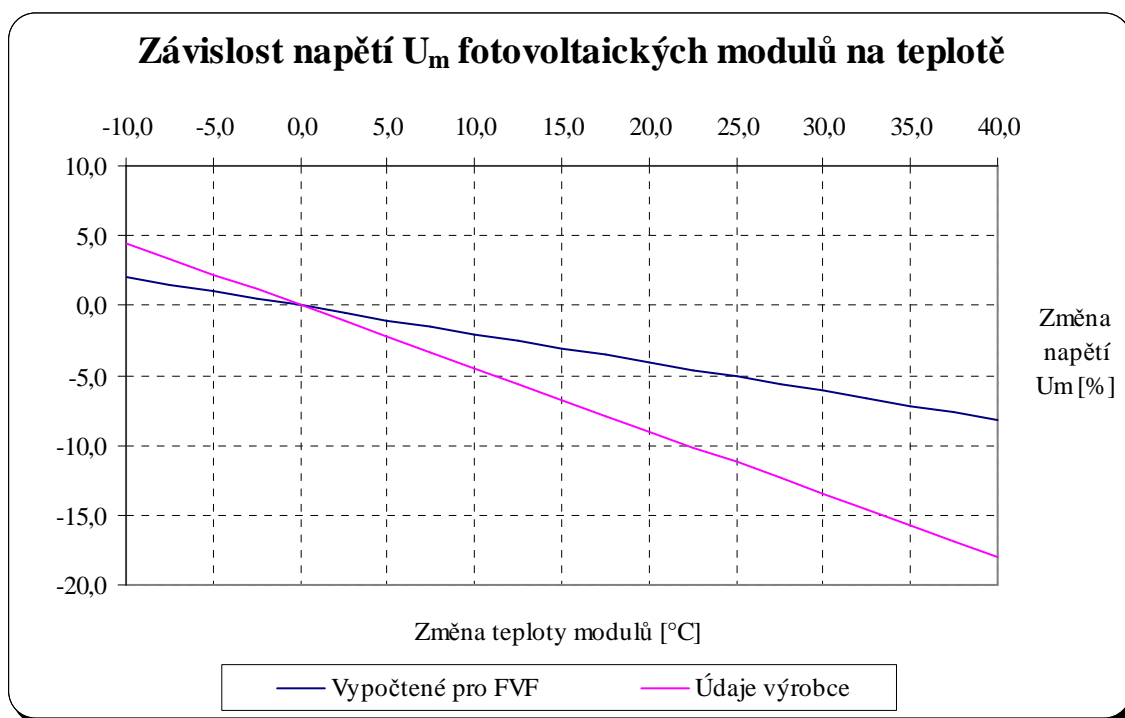
Příloha č. 21: Hodinové průměry účinnosti FVF ze dne 23. listopadu 2005



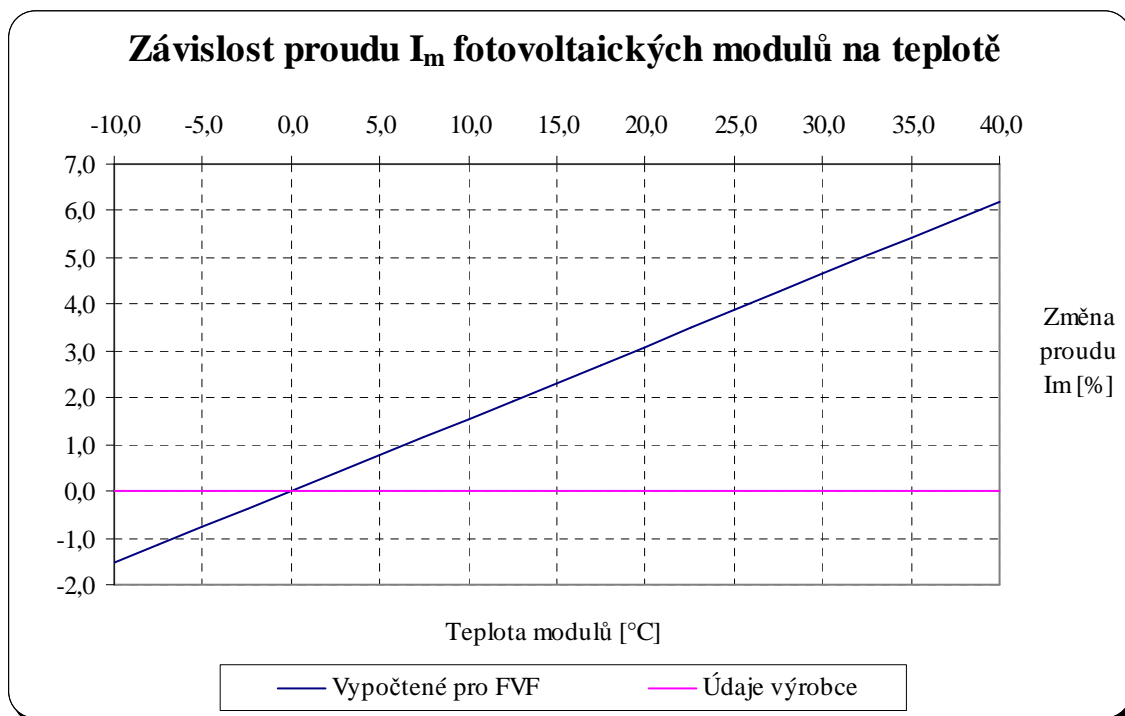
Příloha č. 22: Průběh účinnosti měniče napětí na FVF ze dne 23. listopadu 2005



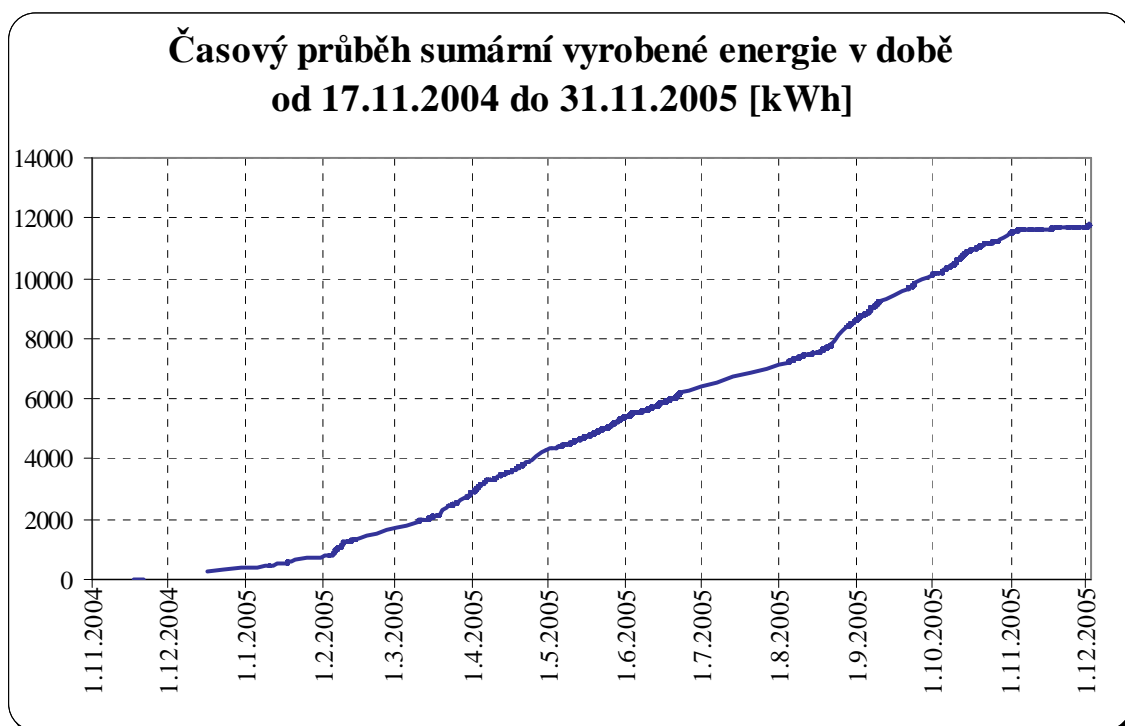
Příloha č. 23: Závislost napětí U_m modulů FVF na teplotě



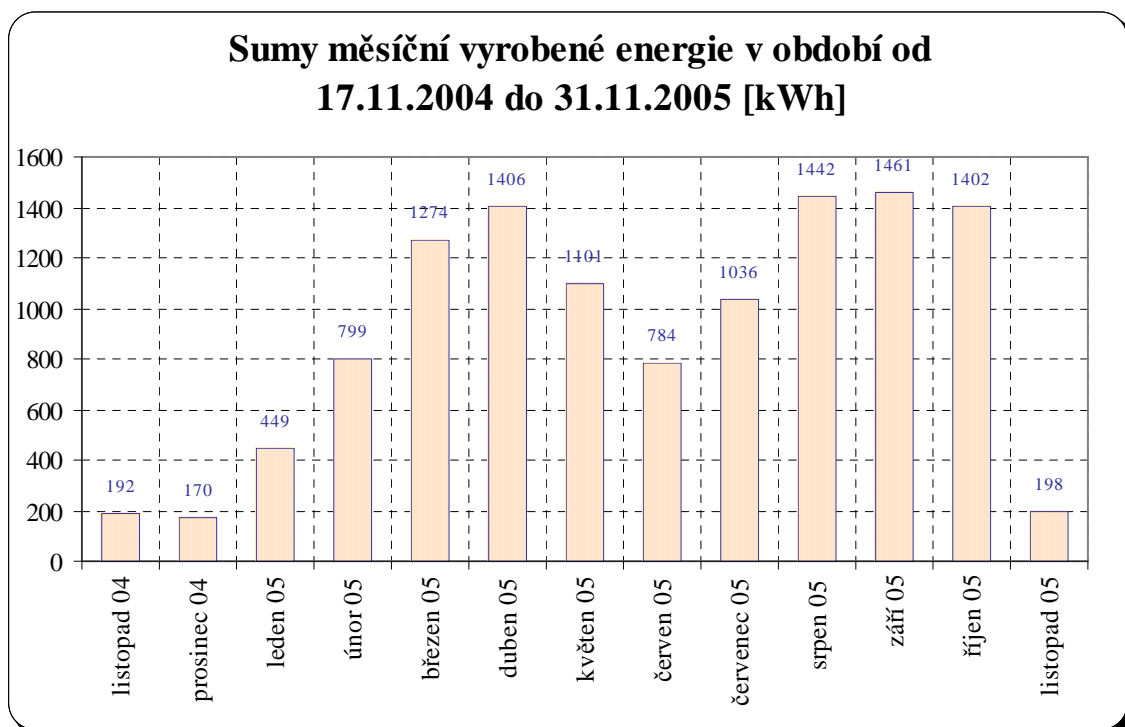
Příloha č. 24: Závislost proudu I_m modulů FVF na teplotě



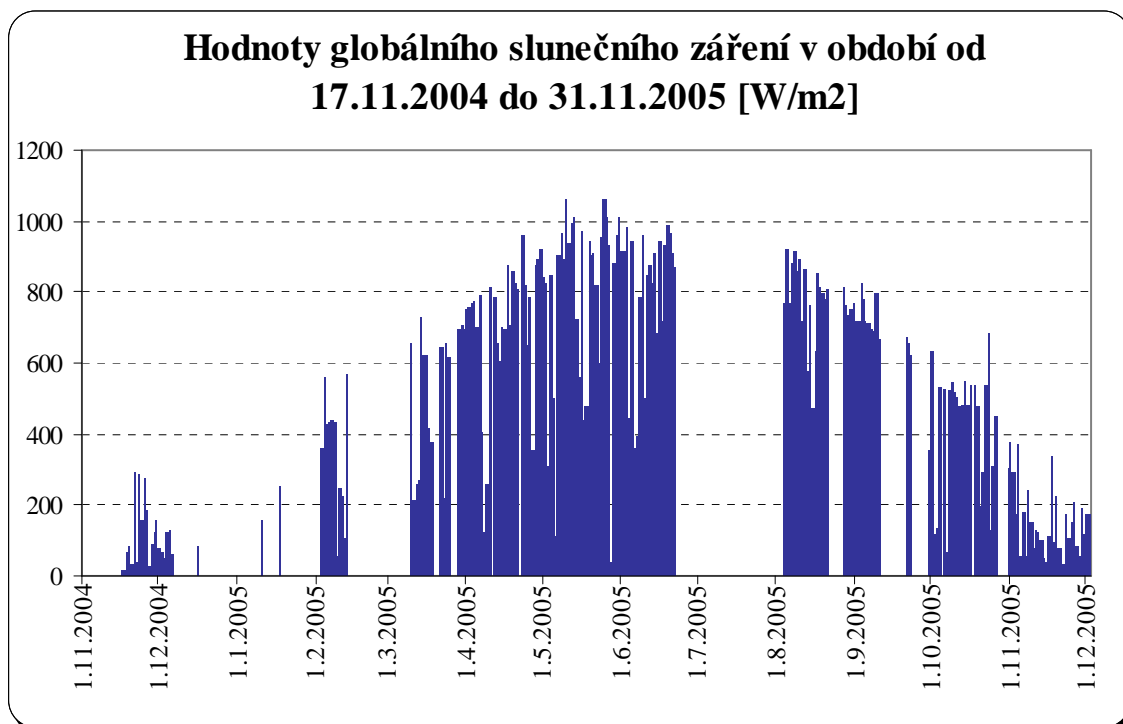
Příloha č. 25: Časový průběh vyrobené energie FVF v době od 17.11.04 do 31.11.05



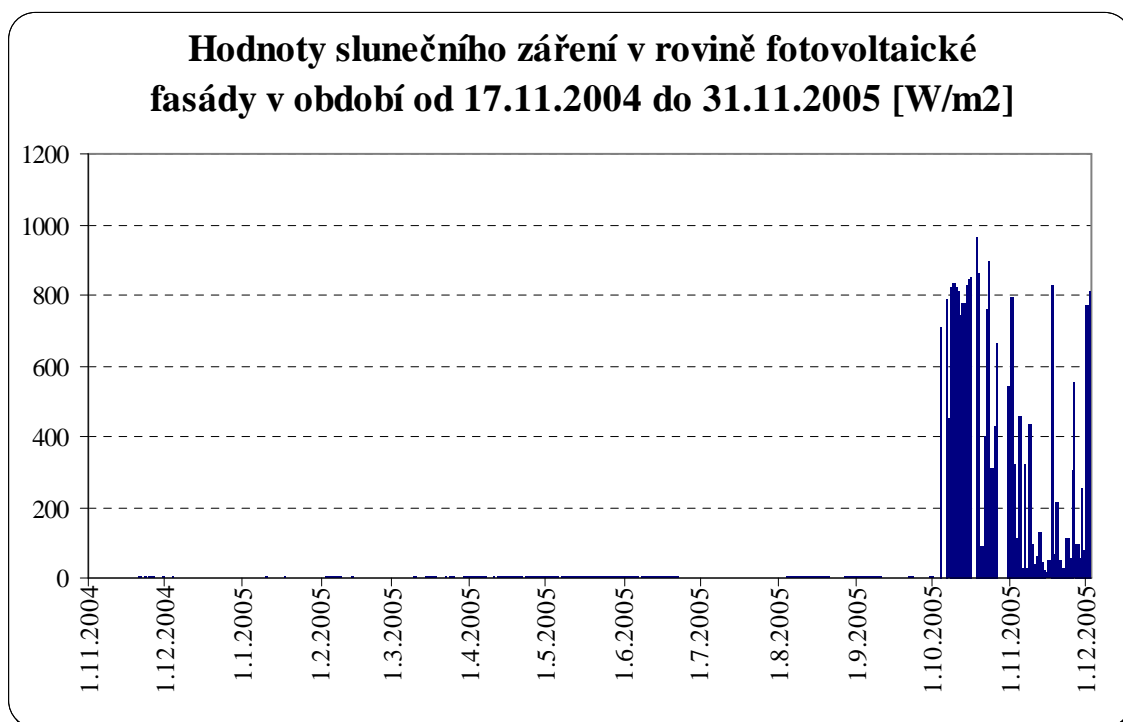
Příloha č. 26: Sumy měsíční vyrobené energie FVF od 17.11.04 do 31.11.05



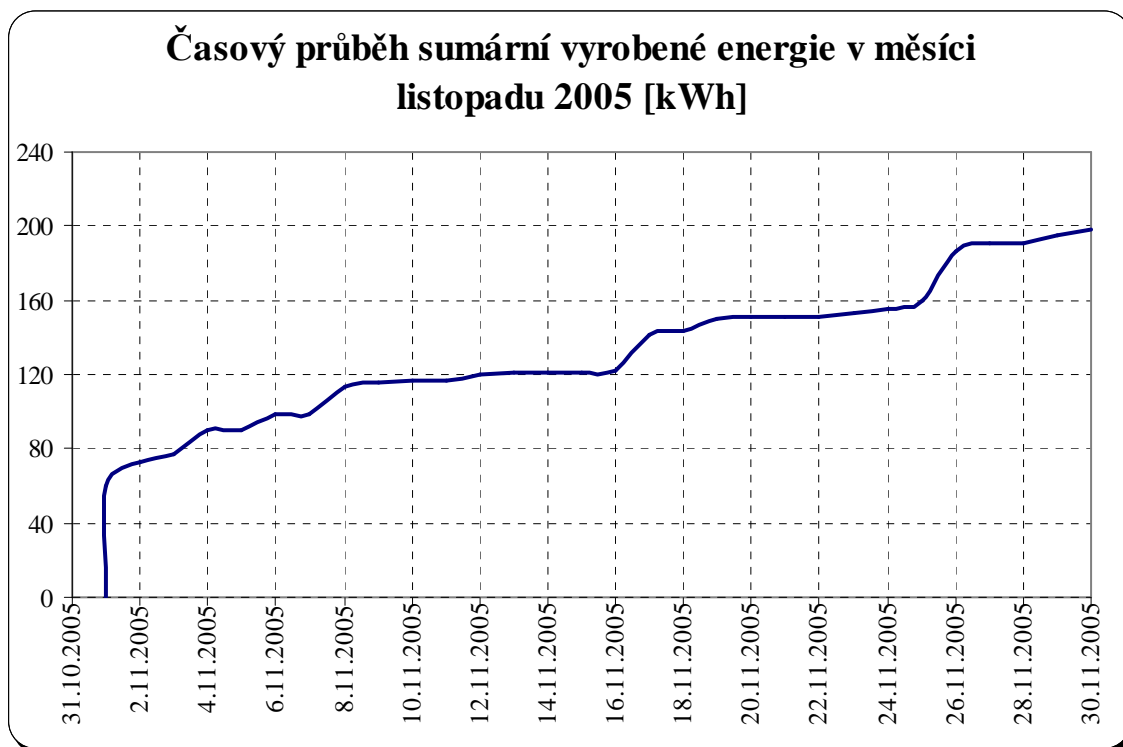
Příloha č. 27: Průběh globálního slunečního záření G_h naměřeného na FVF v období od 17.11.04 do 31.11.05



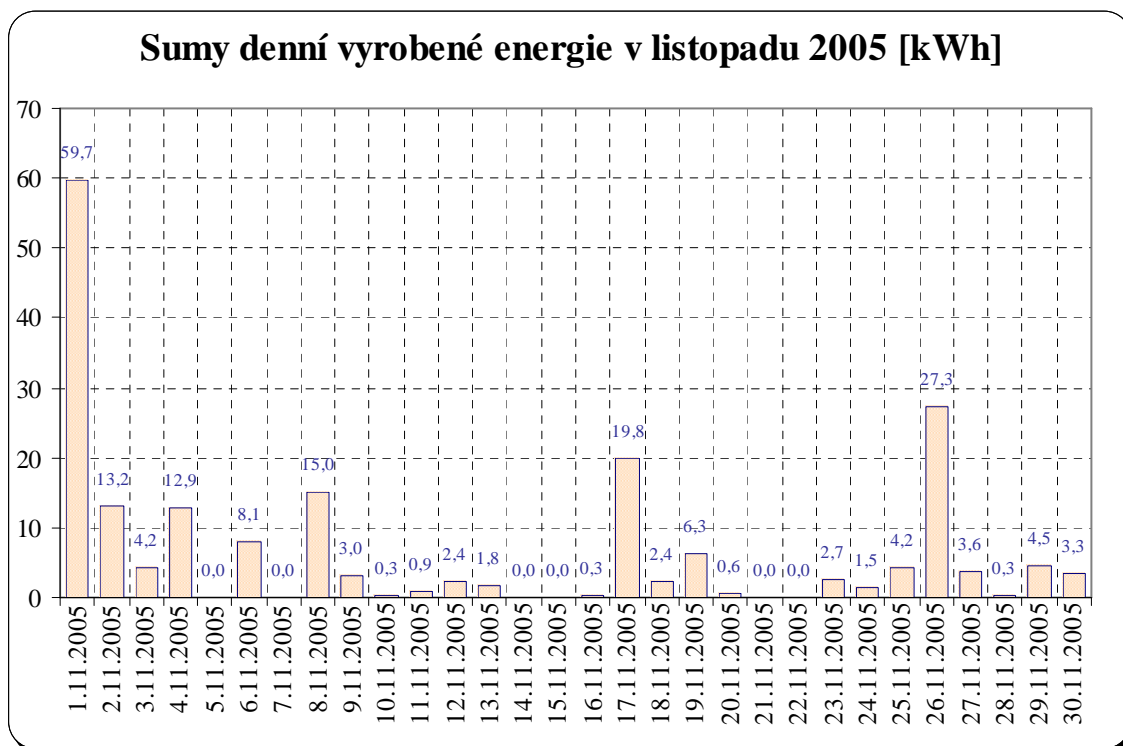
Příloha č. 28: Průběh intenzity slunečního záření G_i v rovině FVF naměřeného v období od 17.11.04 do 31.11.05



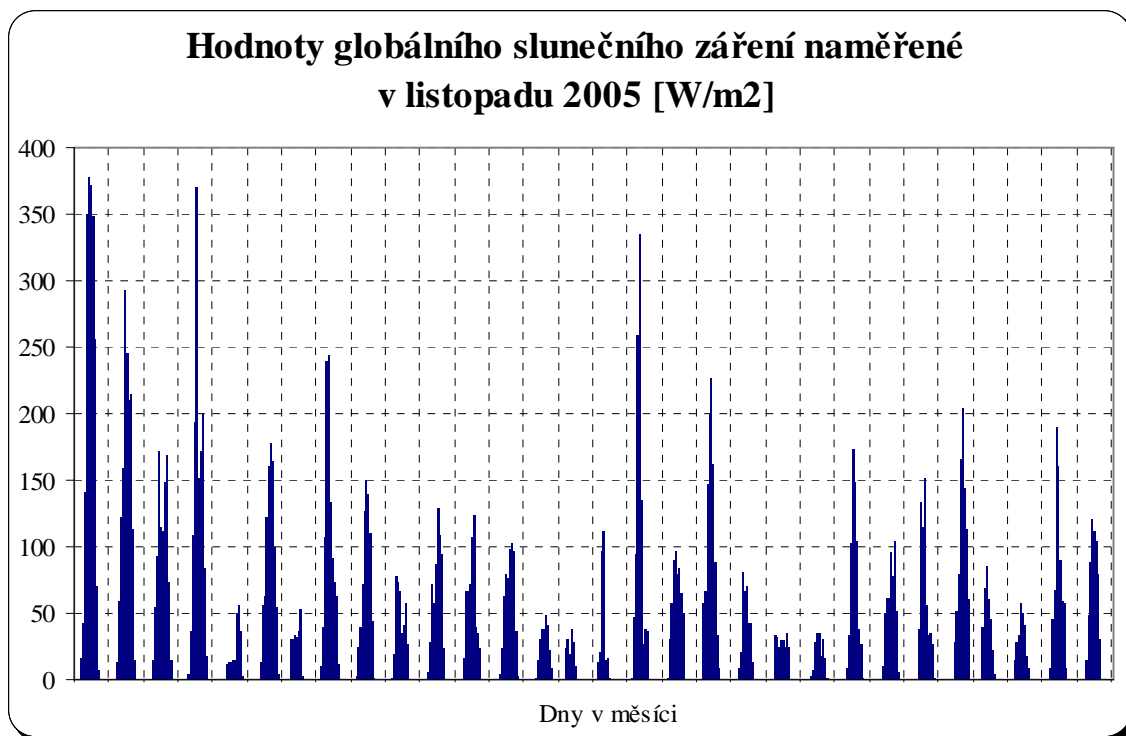
Příloha č. 29: Časový průběh vyrobené energie FVF v měsíci listopadu 2005



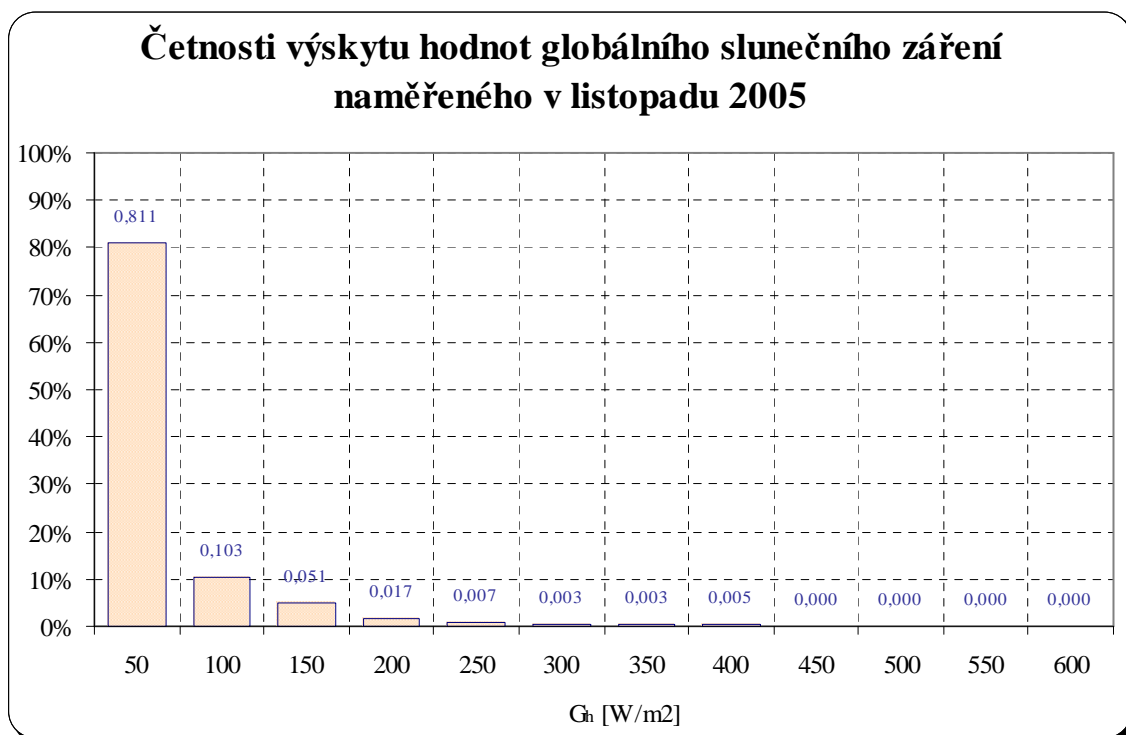
Příloha č. 30: Sumy denní vyrobené energie FVF v měsíci listopadu 2005



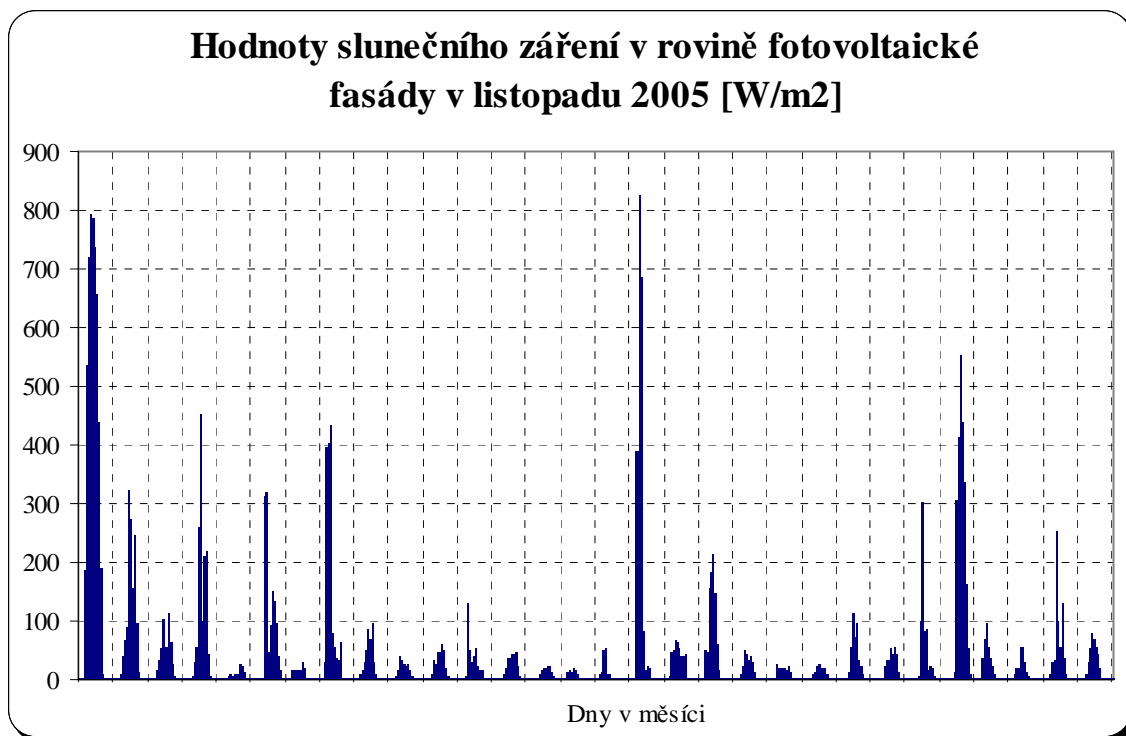
Příloha č. 31: Průběh globálního slunečního záření G_h naměřeného na FVF v listopadu 2005



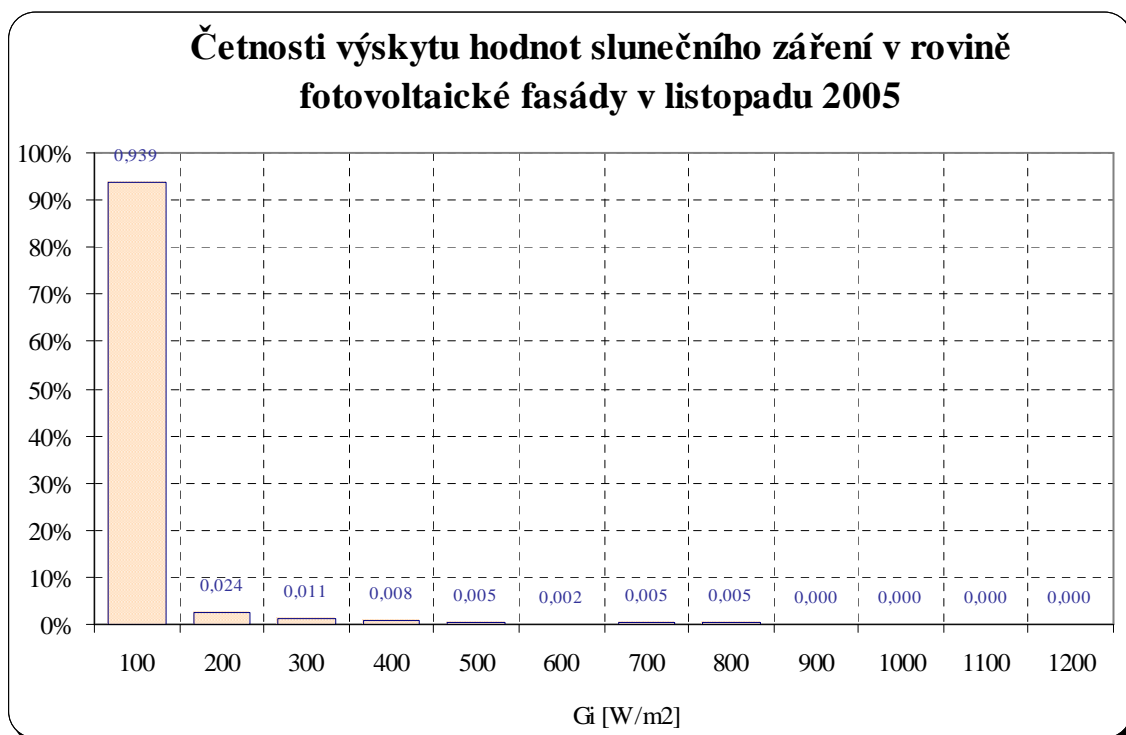
Příloha č. 32: Četnosti výskytu hodnot globálního slunečního záření naměřeného na FVF v listopadu 2005



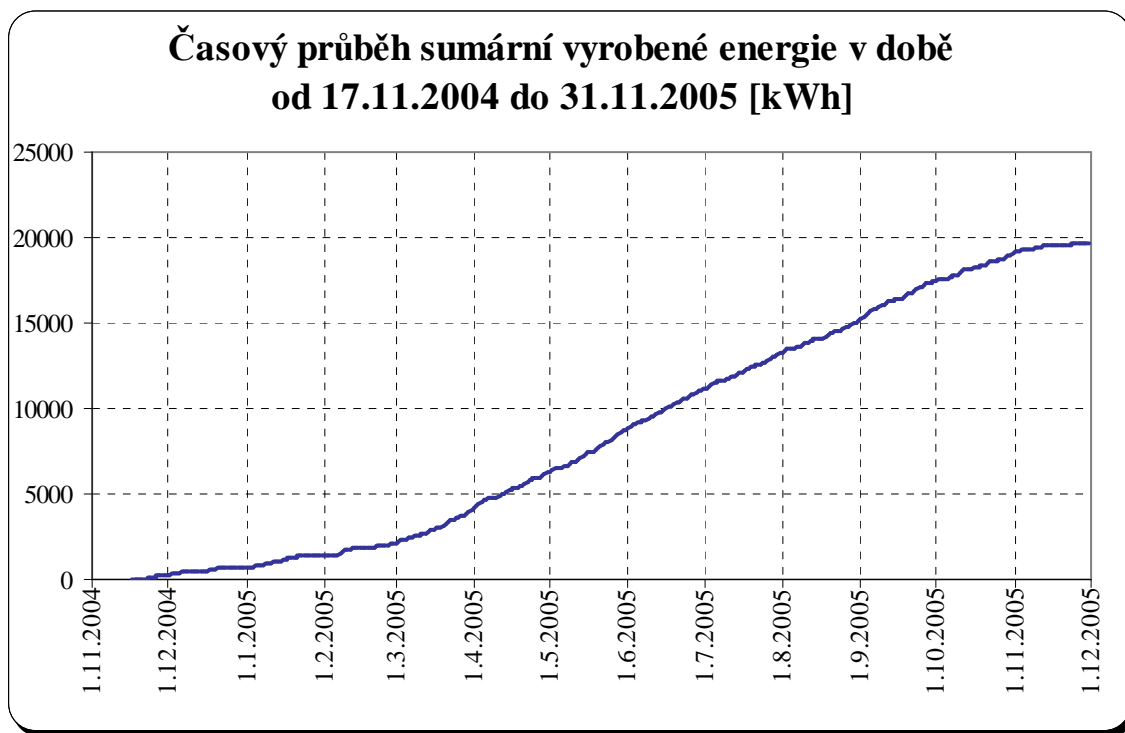
Příloha č. 33: Průběh intenzity slunečního záření G_i v rovině FVF naměřeného v listopadu 2005



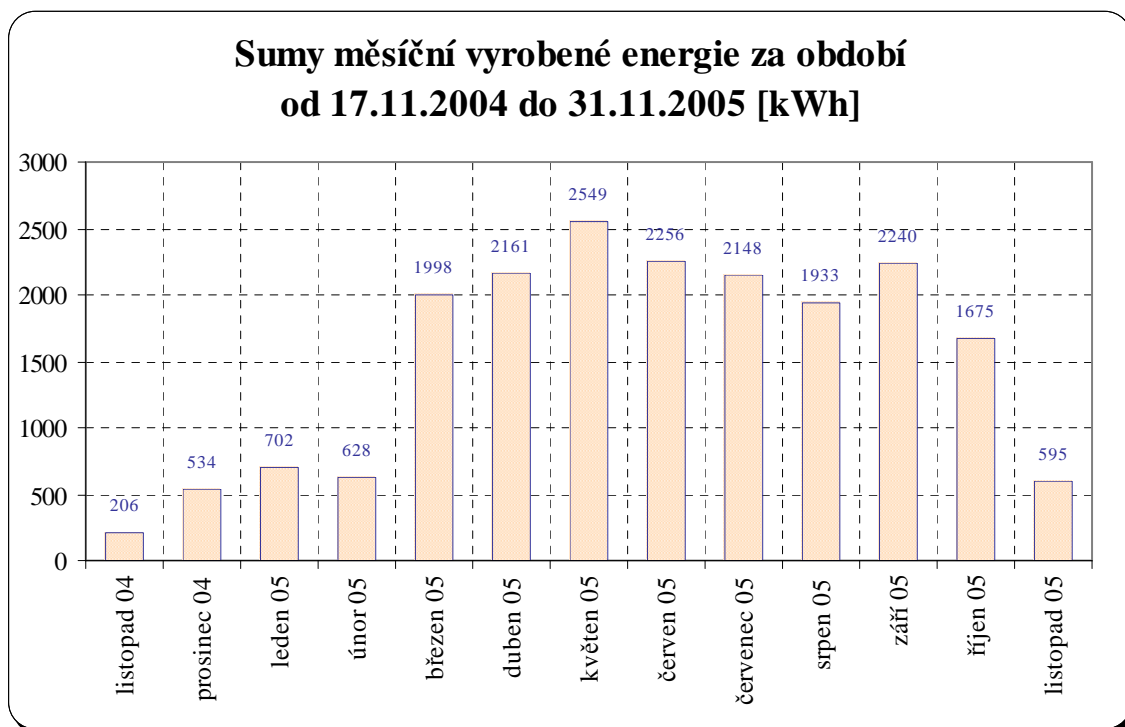
Příloha č. 34: Četnosti výskytu hodnot intenzity slunečního záření v rovině FVF naměřeného v listopadu 2005



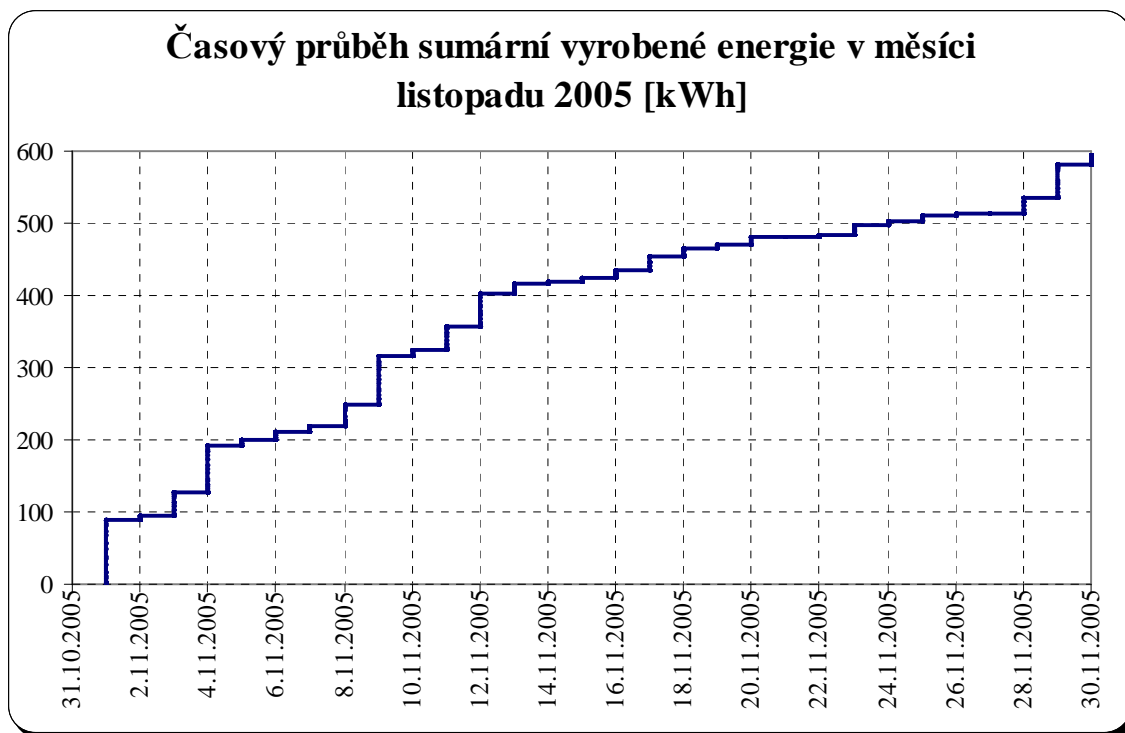
Příloha č. 35: Časový průběh vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě v době od 17.11.04 do 31.11.05



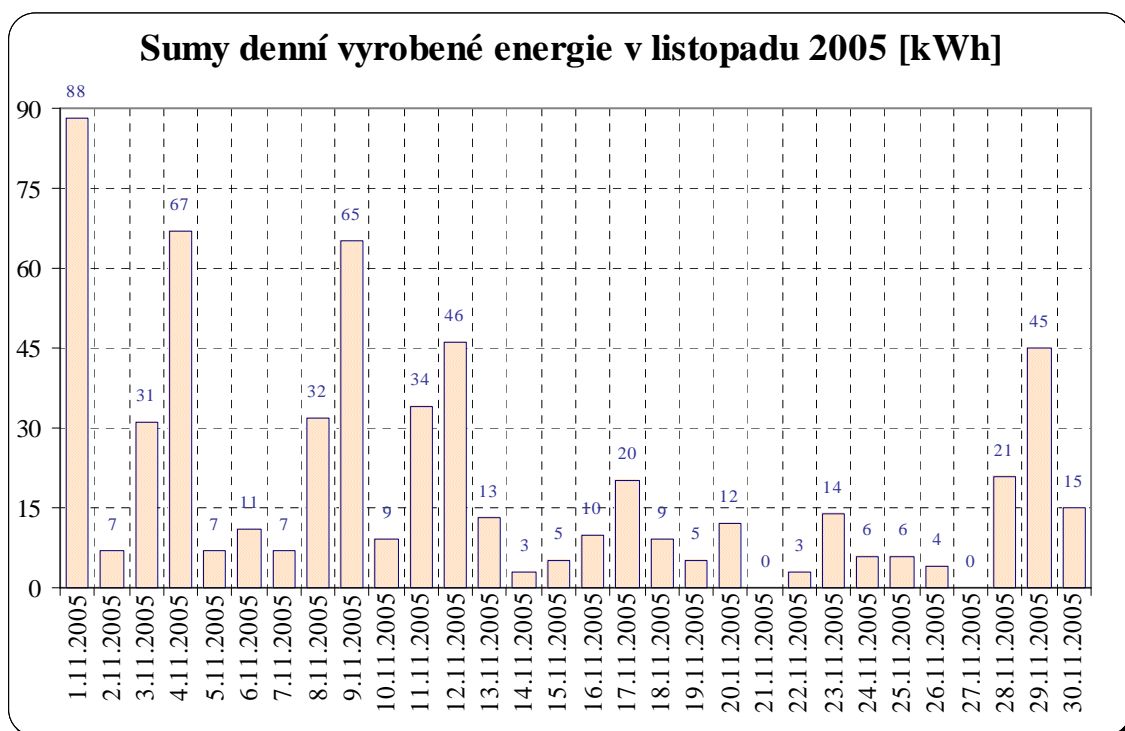
Příloha č. 36: Sumy měsíční vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě od 17.11.04 do 31.11.05



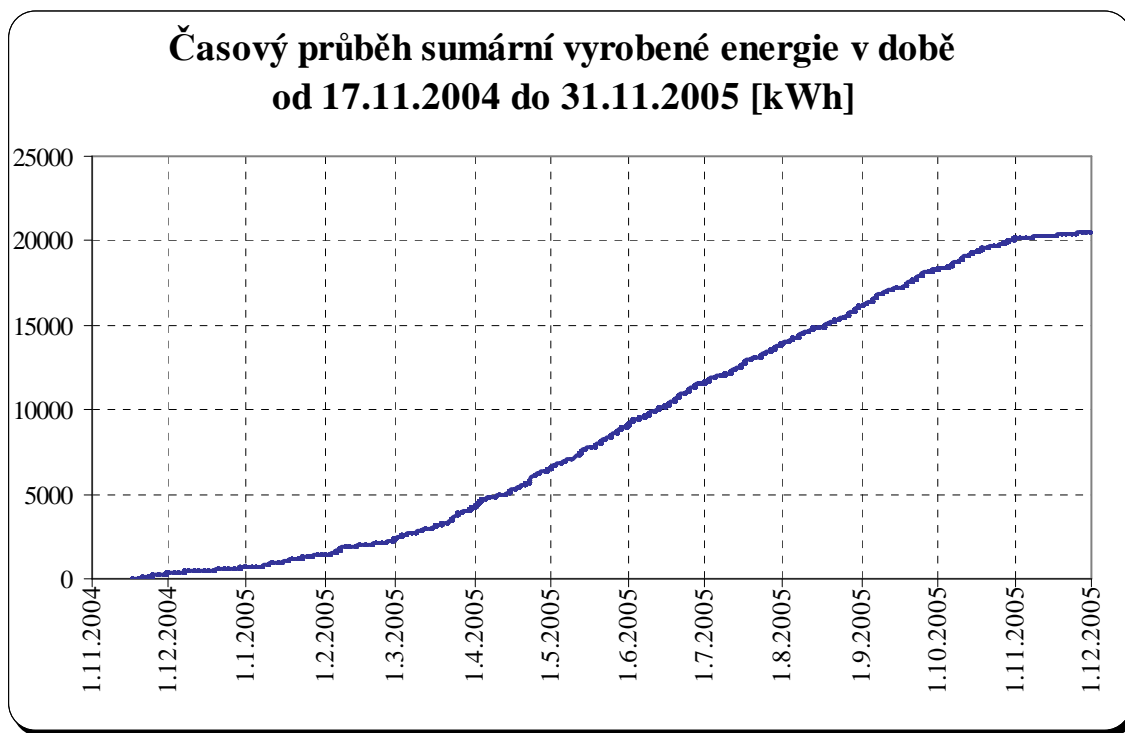
Příloha č. 37: Časový průběh vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě v měsíci listopadu 2005



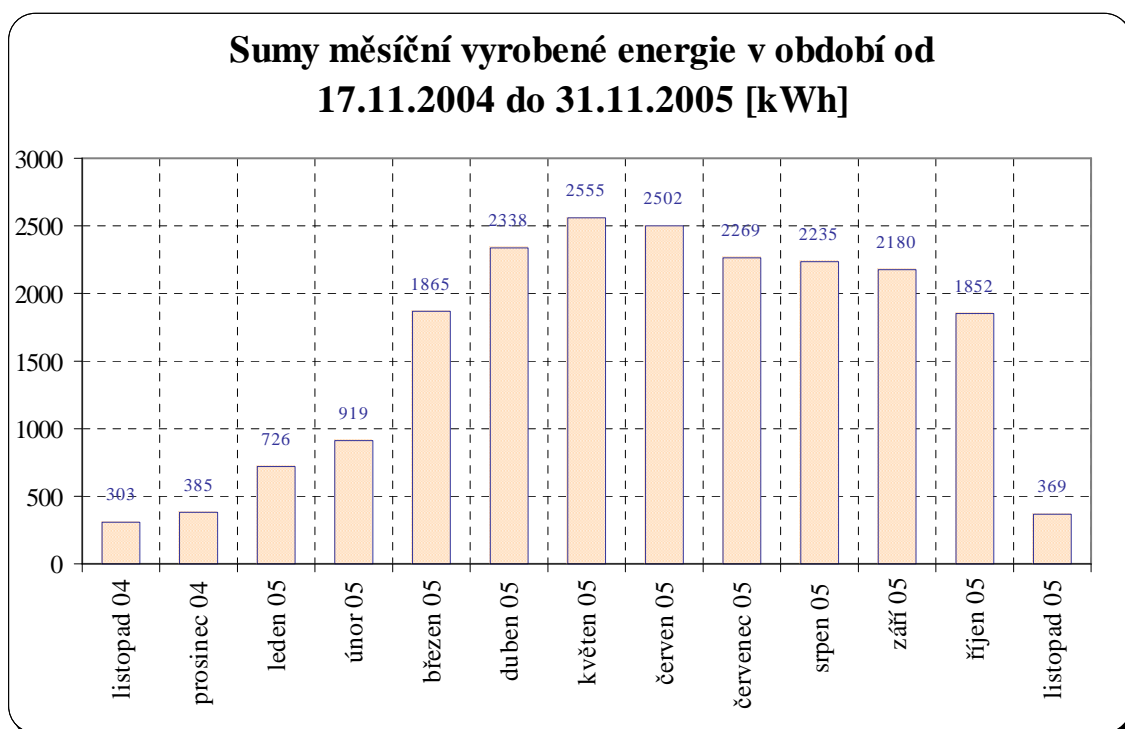
Příloha č. 38: Sumy denní vyrobené energie FVI na VŠB – TU v Ostravě v měsíci listopadu 2005



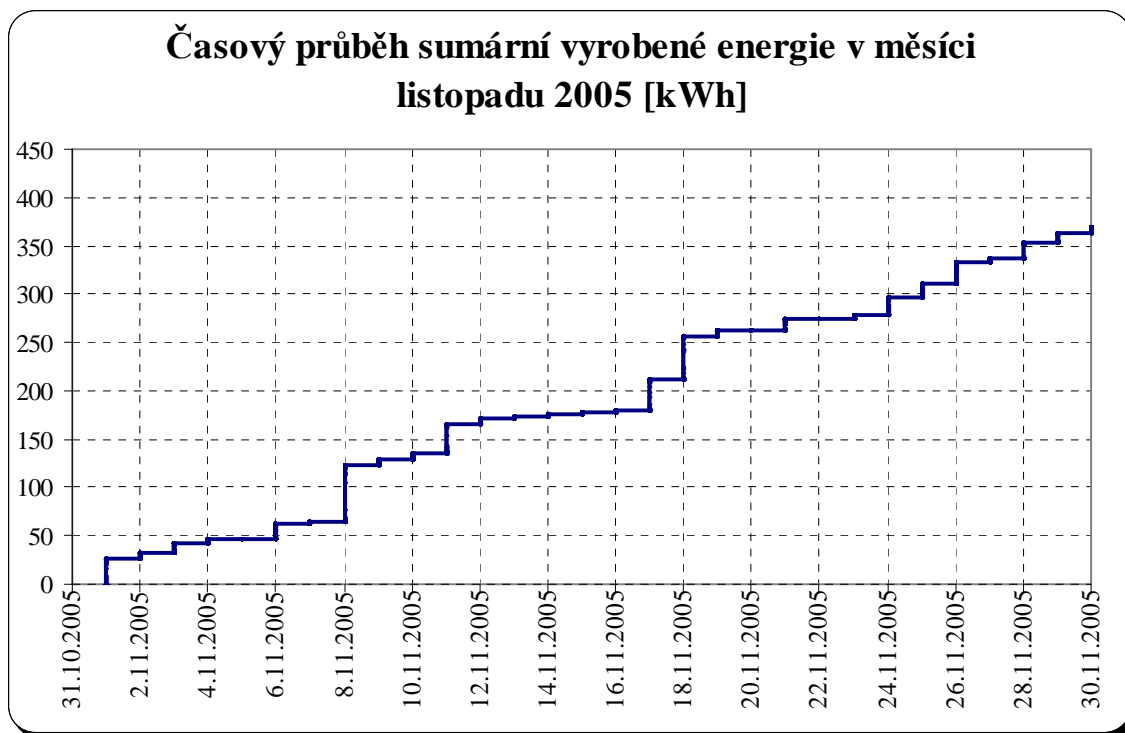
Příloha č. 39: Časový průběh vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze v době od 17.11.04 do 31.11.05



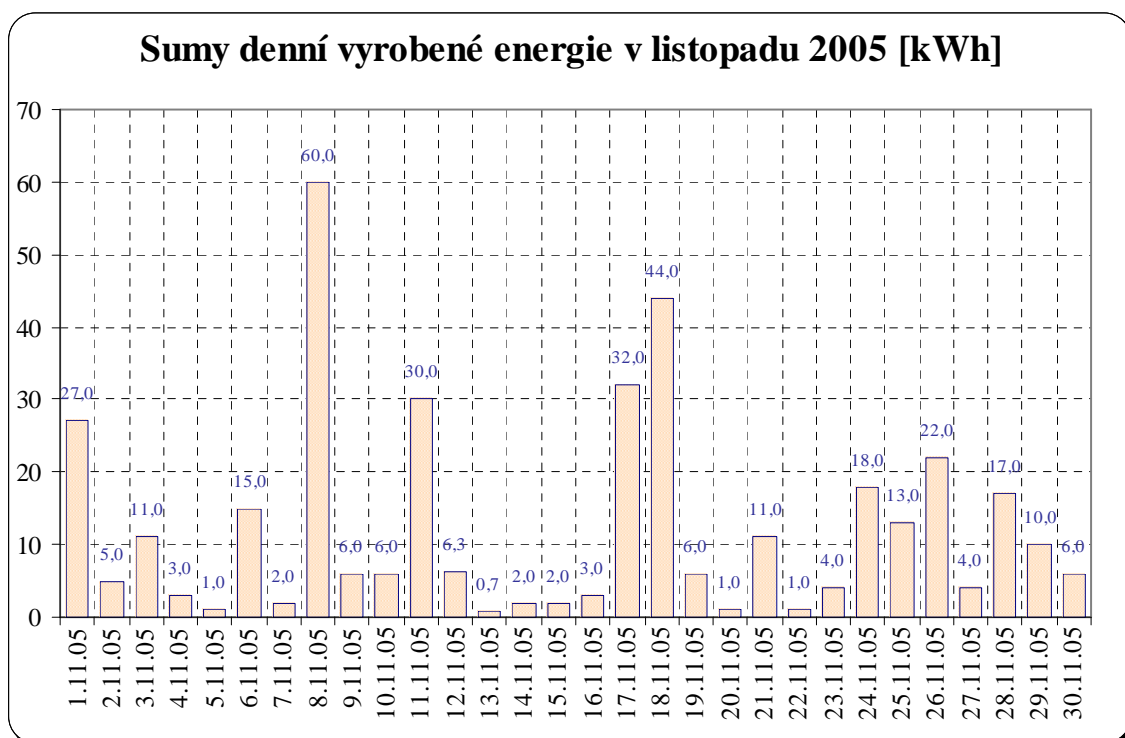
Příloha č. 40: Sumy měsíční vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze od 17.11.04 do 31.11.05



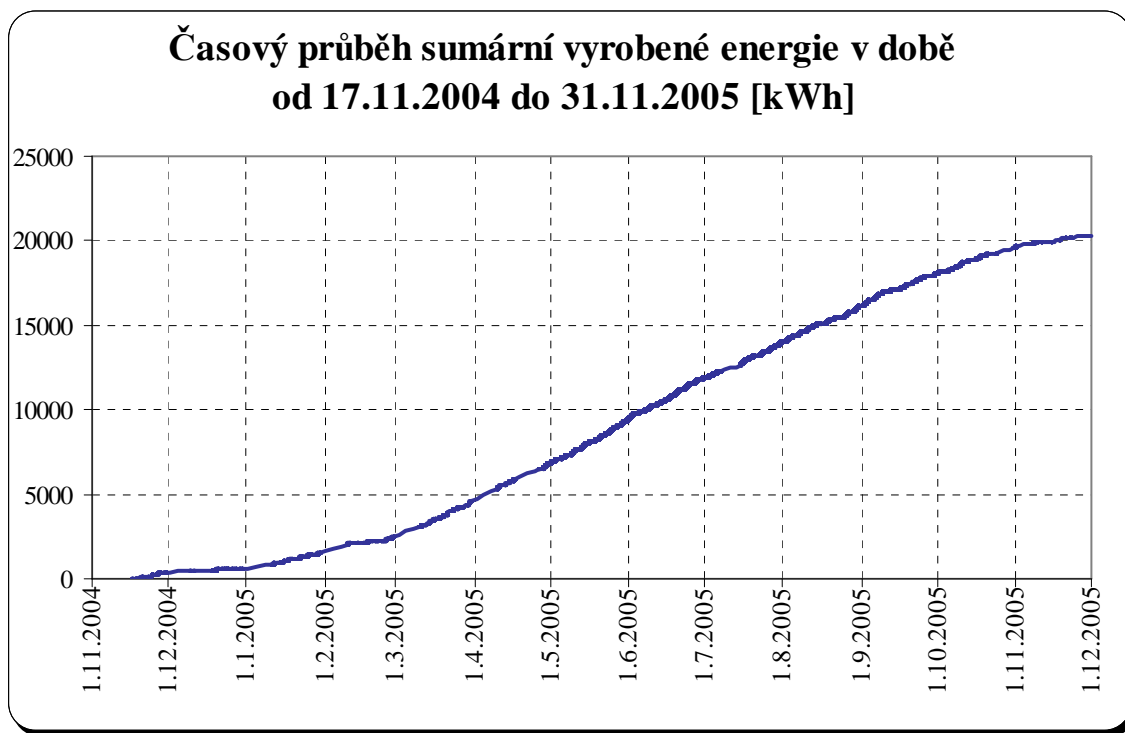
Příloha č. 41: Časový průběh vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze v měsíci listopadu 2005



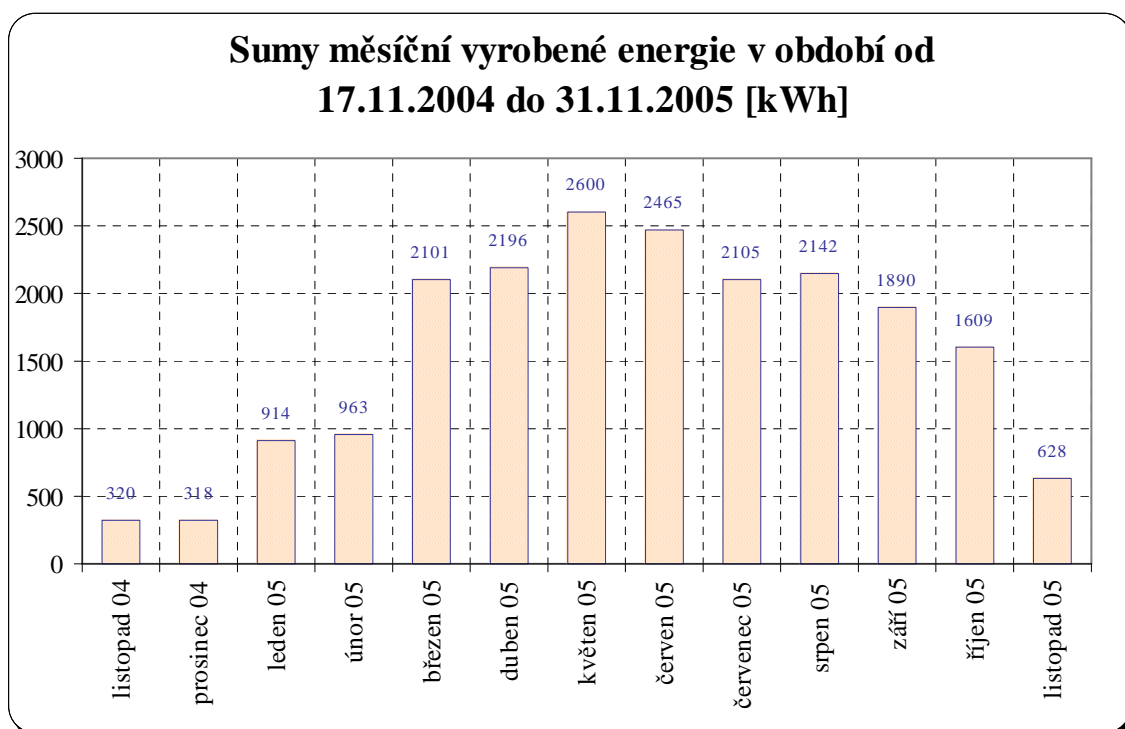
Příloha č. 42: Sumy denní vyrobené energie FVI na MFF UK v Praze v měsíci listopadu 2005



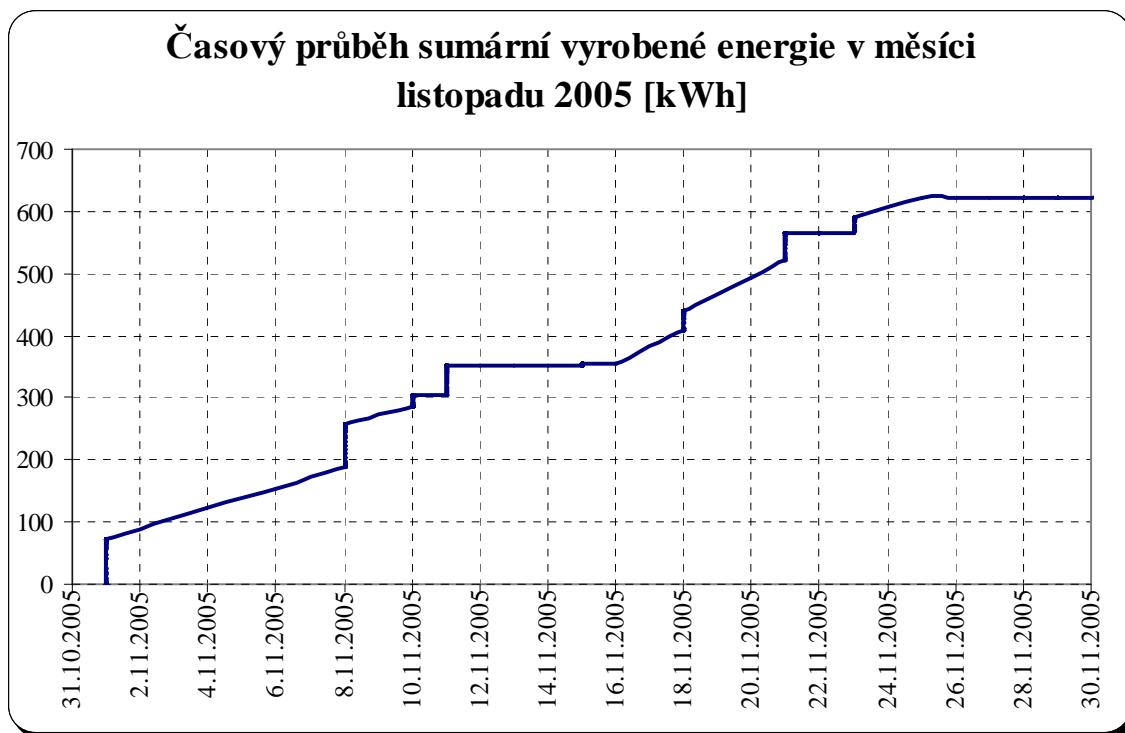
Příloha č. 43: Časový průběh vyrobené energie FVI na VUT v Brně v době od 17.11.04 do 31.11.05



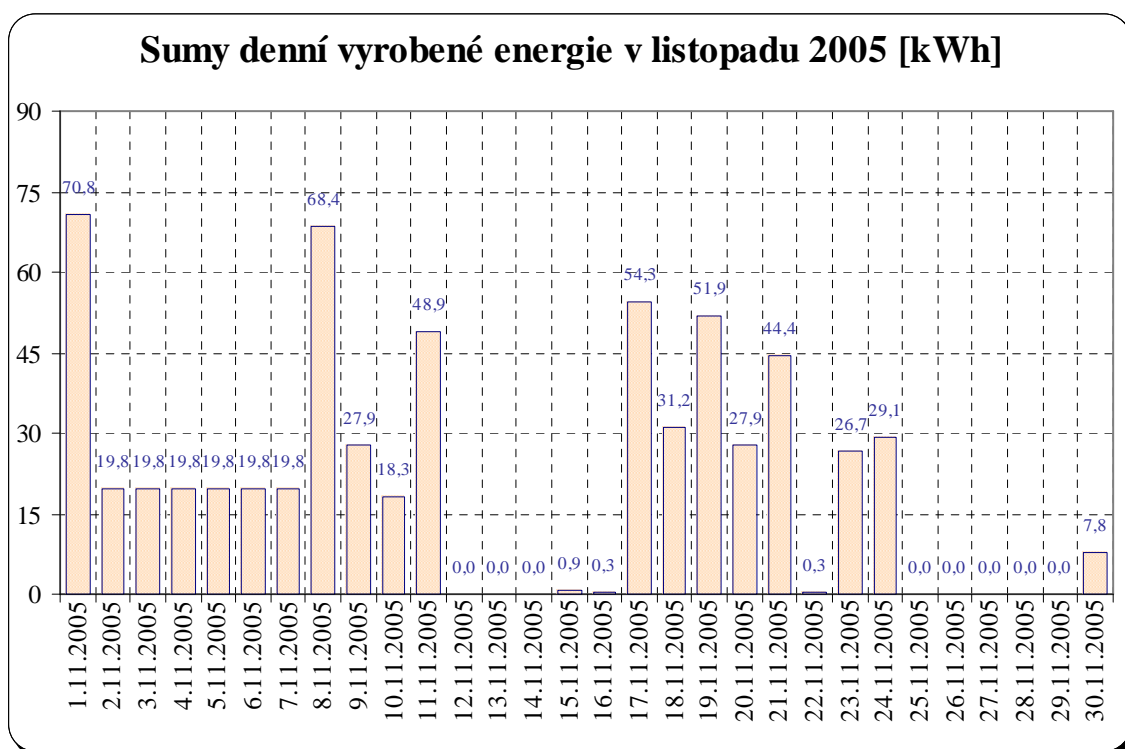
Příloha č. 44: Sumy měsíční vyrobené energie FVI na VUT v Brně od 17.11.04 do 31.11.05



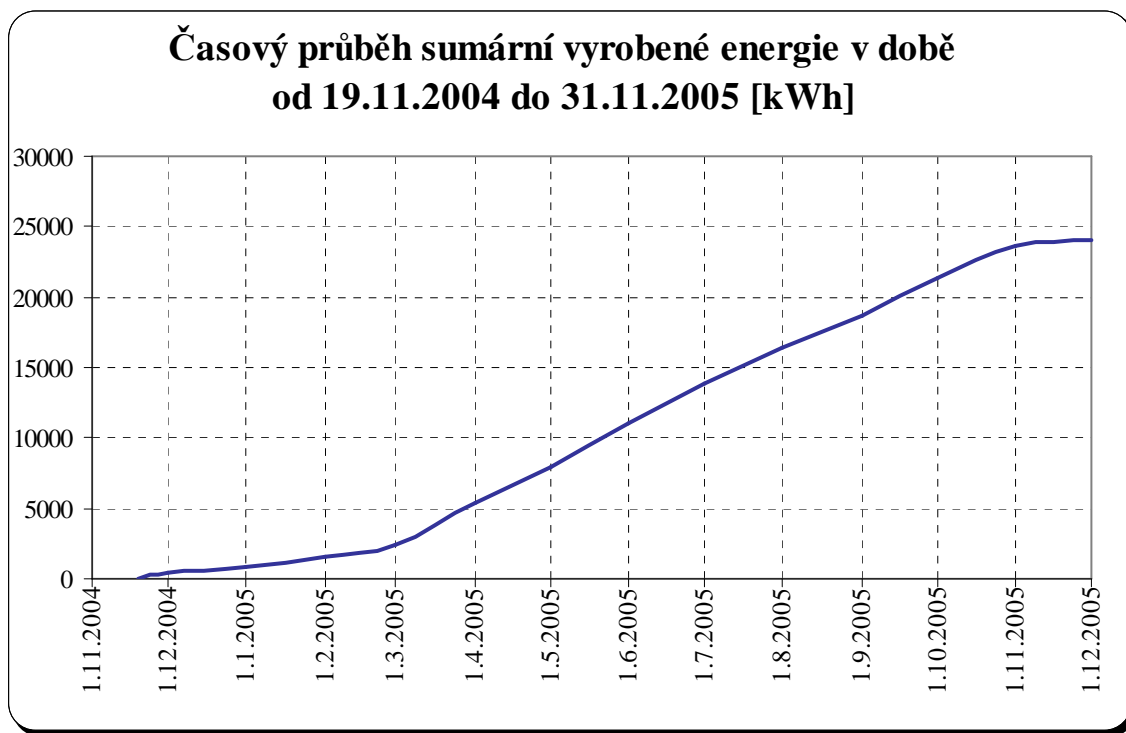
Příloha č. 45: Časový průběh vyrobené energie FVI na VUT v Brně v měsíci listopadu 2005



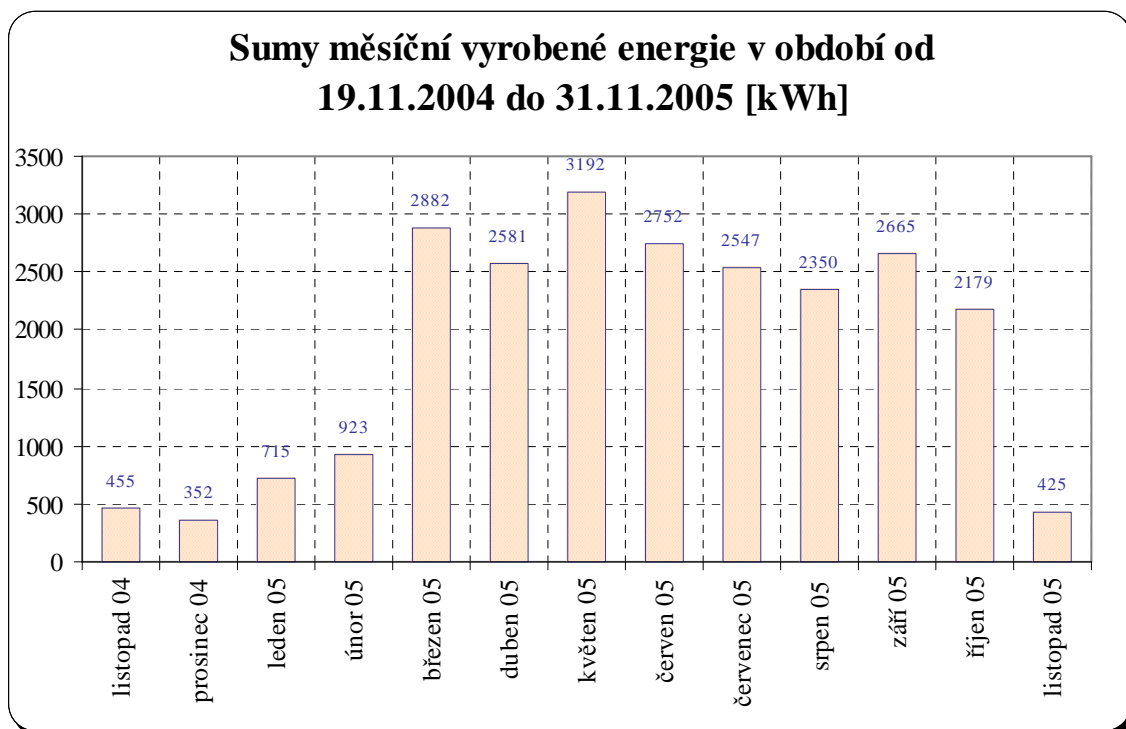
Příloha č. 46: Sumy denní vyrobené energie FVI na VUT v Brně v listopadu 2005



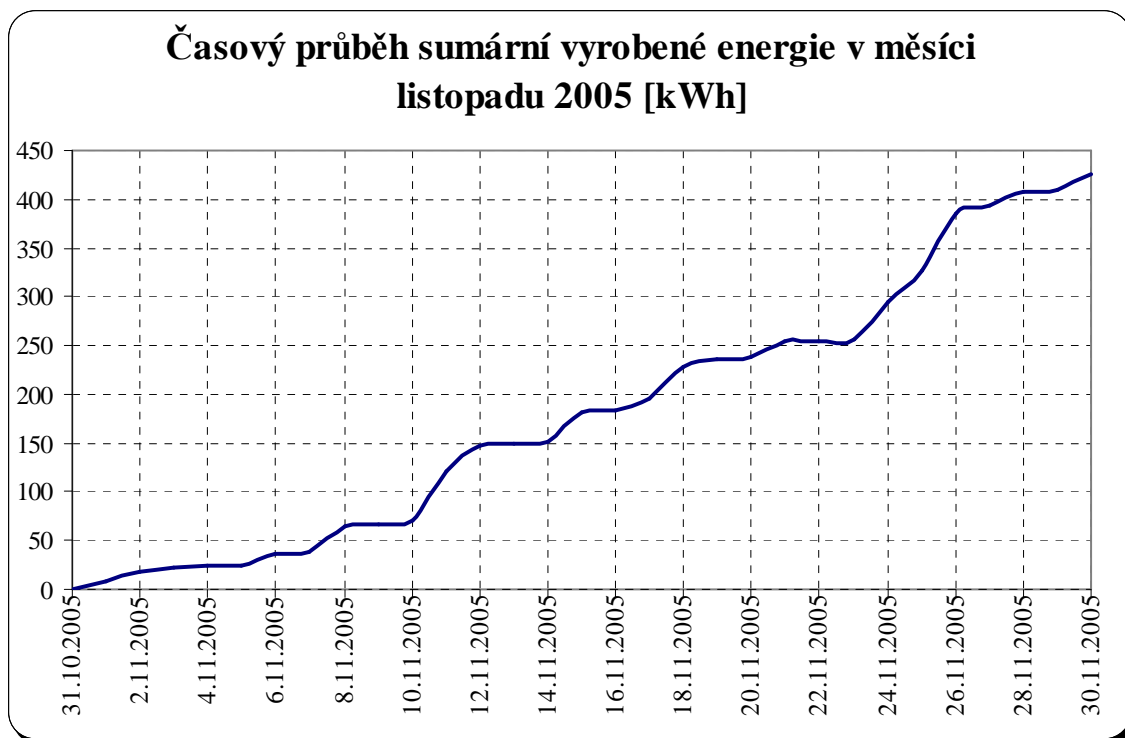
Příloha č. 47: Časový průběh vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni v době od 19.11.04 do 31.11.05



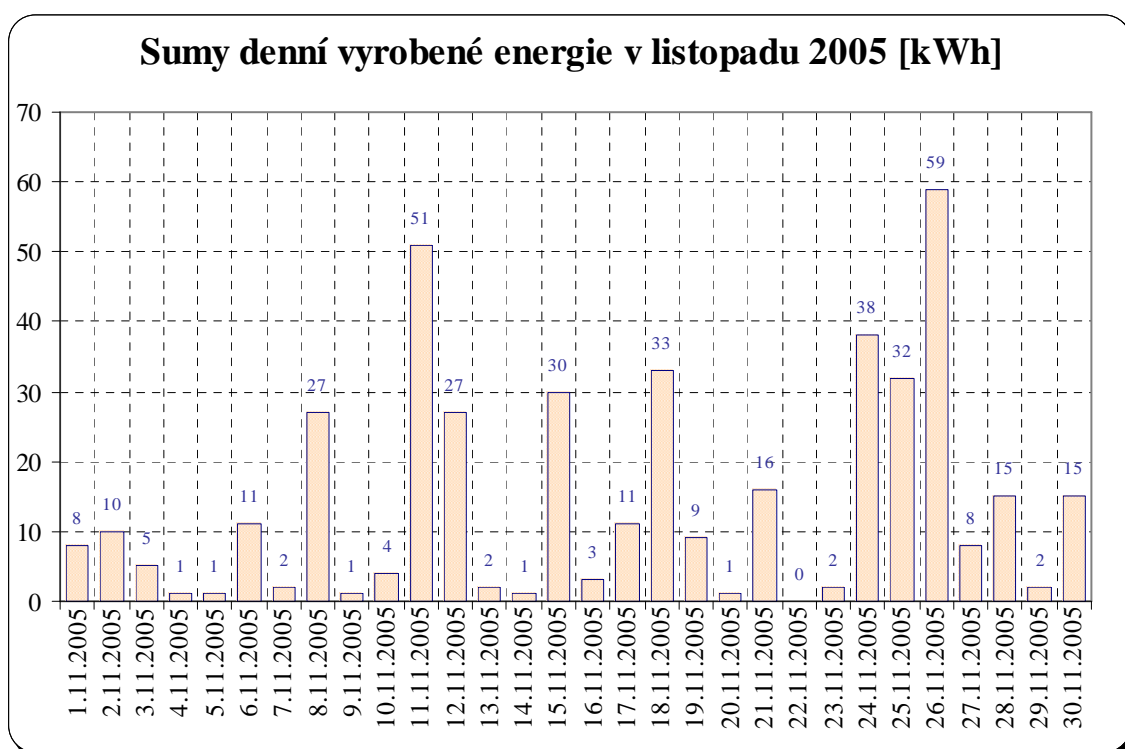
Příloha č. 48: Sumy měsíční vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni od 19.11.04 do 31.11.05



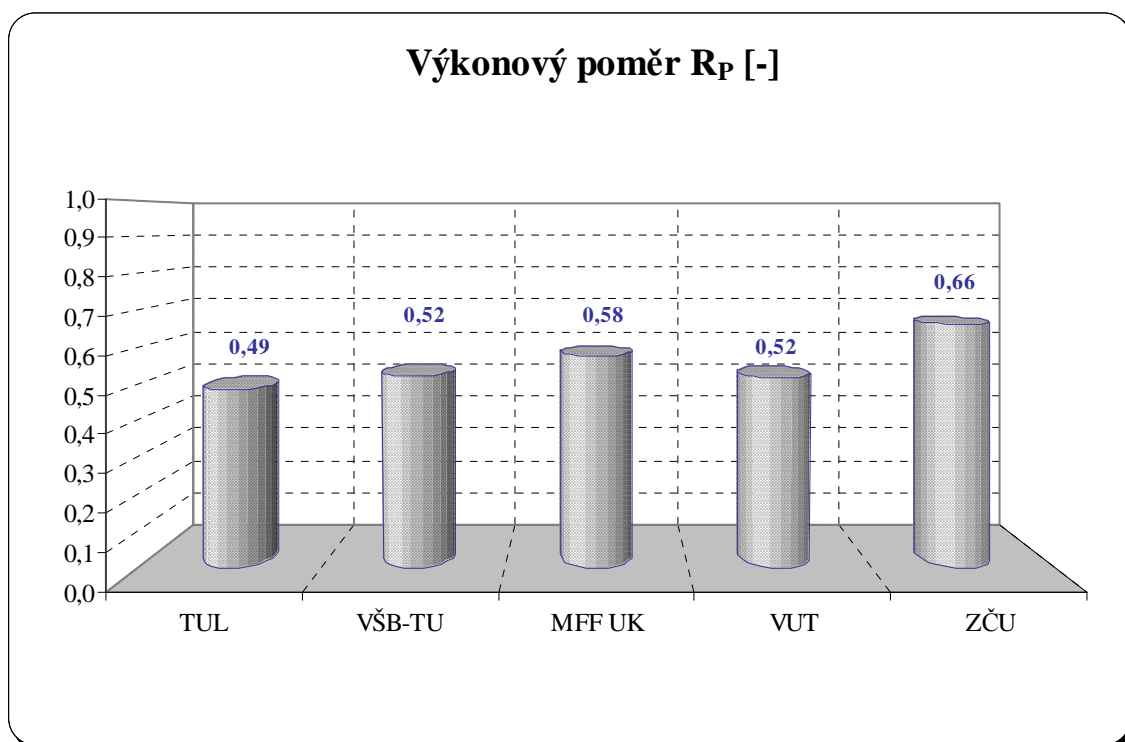
Příloha č. 49: Časový průběh vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni v měsíci listopadu 2005



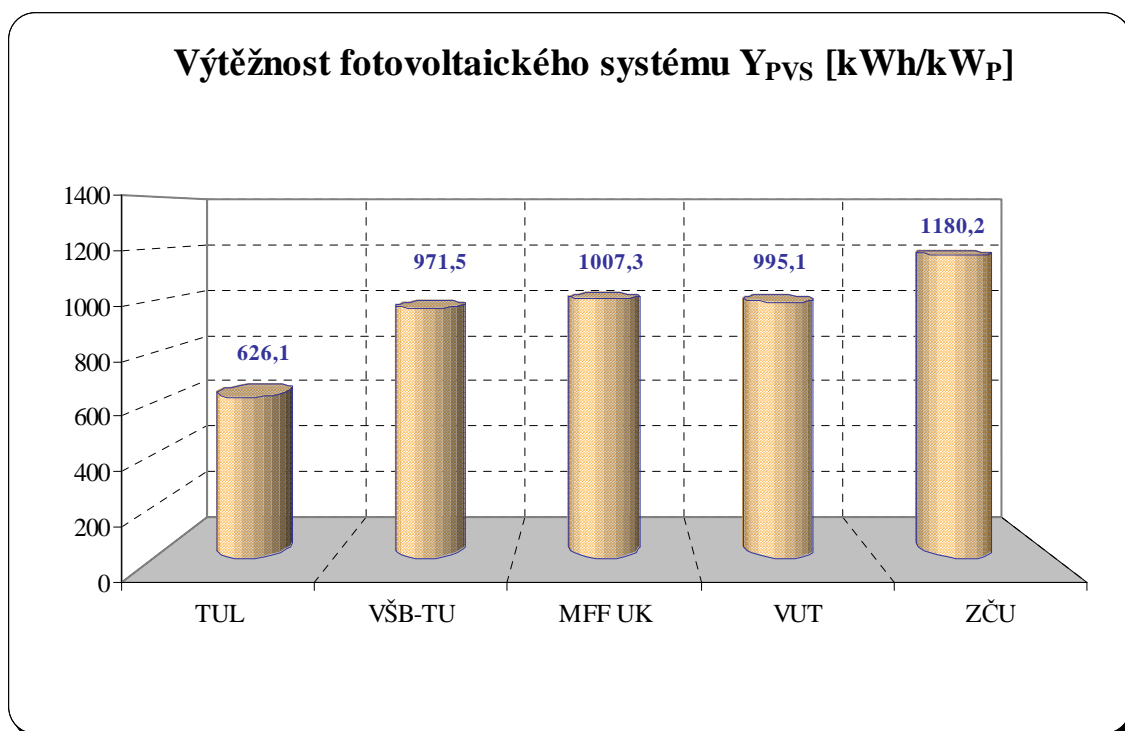
Příloha č. 50: Sumy denní vyrobené energie FVI na ZČU v Plzni v listopadu 2005



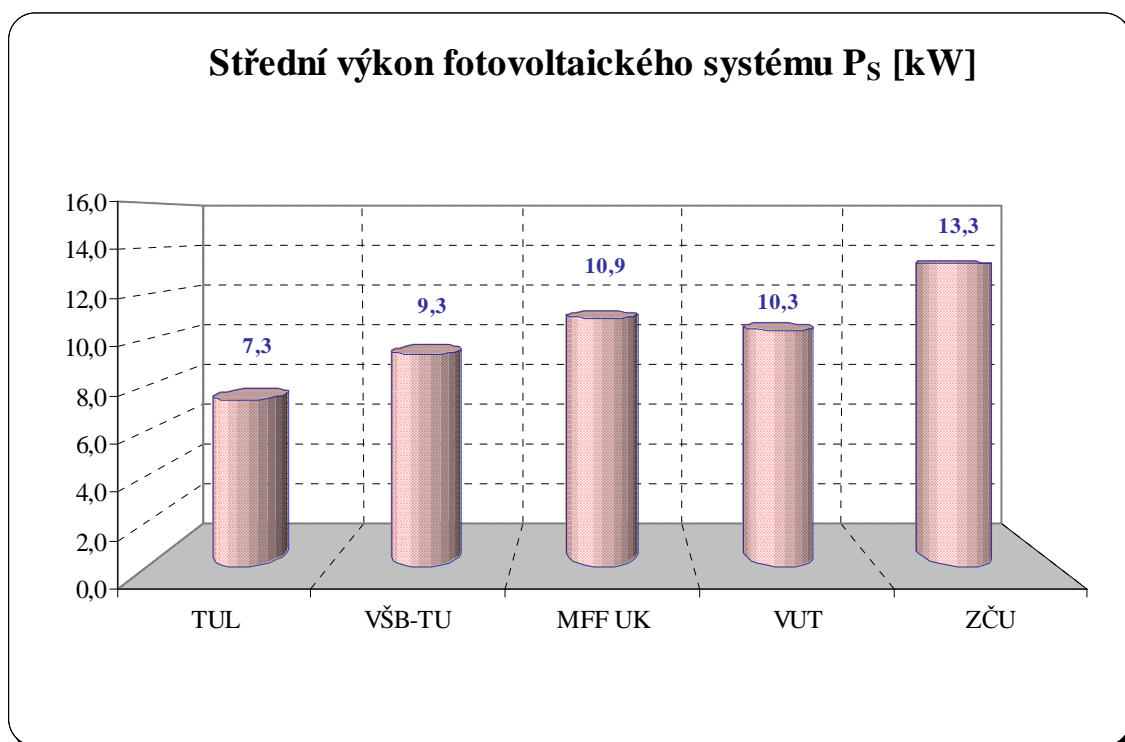
Příloha č. 51: Výkonový poměr R_P fotovoltaické fasády na TU v Liberci



Příloha č. 52: Výtěžnost Y_{PVS} fotovoltaické fasády na TU v Liberci



Příloha č. 53: Střední výkon P_S fotovoltaické fasády na TU v Liberci



Příloha č. 54: Faktory použité pro porovnání vyrobené energie jednotlivými FVI

